Université Lyon 1 Claude Bernard
Ecole doctorale MEGA (Mécanique – Energétique – Génie Civil –Acoustique)

Thèse

Modélisation et positionnement de solutions bioclimatiques dans le bâtiment résidentiel existant

Pour obtenir le grade de

Docteur de l'Université Lyon 1 Claude Bernard

Spécialité « Génie Civil »

Présentée et soutenue publiquement par

Caroline FLORY-CELINI

Le 19 juin 2008

Directeur de thèse

Joseph VIRGONE

Jury

Pr. Gilbert ACHARD	Université de Savoie	………	Rapporteur
Pr. Claude-Alain ROULET	Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne	………	Rapporteur
Pr. André DE HERDE	Université Catholique de Louvain	………	Examinateur
Denis COVALET	EDF R&D	………	Co-directeur de thèse
Dr. Thierry DUFORESTEL	EDF R&D	………	Examinateur
Pr. Eric JACQUELIN	Université Claude Bernard Lyon I	………	Examinateur
Pr. Jean-Jacques ROUX	INSA de Lyon	………	Examinateur
Dr. Joseph VIRGONE	Université Claude Bernard Lyon I	………	Directeur de thèse
Pr. Roger PHAN TAN LUU	Université d'Aix Marseille	………	Invité

A Dally et Yayi, pour leur diligence et leur patience
A Manman Yvonne

REMERCIEMENTS

Claudia LUCE, après s'être chargée de l'éducation de ses enfants, a décidé, une fois qu'ils étaient adultes, de poursuivre son cursus universitaire : merci maman pour tout ce que tu as fait et continue de faire pour nous et pour ce modèle que tu nous donnes de « Fenm, Flanm doubout' », comme toutes les femmes de la famille. Merci d'avoir pris soin de Dally au cours des nombreux déplacements. Merci à toi aussi Dally qui, malgré ton jeune âge, a su comprendre l'importance de ces étapes dans nos vies.

Reprendre les études après cinq années d'activités professionnelles fut un défi à relever stimulé par une éducation, mais aussi par des rencontres qui marquent une vie comme feu Camille TALKEU ou encore Joseph KENFACK qui ont su réveillé le désir de repartir sur les chemins de « l'école ».

Merci à Krystel et Michael COPPET et Madyna LUCE pour toutes ces phrases encourageantes et toute cette aventure partagée au quotidien !

Merci à Leyla, David et Yari THOMAS pour les conseils amicaux et professionnels.

L'envie de spécialisation dans l'architecture bioclimatique a été stimulée par une structure: Hespul et notamment Maguite CHICHEREAU-DINGUIRARD et Marc JELIDZKA (qui a su rendre à titre anecdotique son logement ancien complètement autonome), mais aussi par de longues diatribes avec un ami Cesar MUGERIN.

Merci à toi Jean-Yves. Merci jumelle Keran pour ton soutien et conseils pour Dally.

Merci à Fabrice LAUL, si plein d'énergie, trop vite parti…

Je remercie également toute l'équipe du CETHIL et de EDF R&D (l'avantage du Laboratoire commun étant d'avoir plus de noms à citer !!) : Dany ESCUDIE, Olivier HARTMANN, Jean-Jacques ROUX et Jean-Luc HUBERT de m'avoir accueillie, Denis COVALET et Joseph VIRGONE de m'avoir encadrée, Thierry DUFORESTEL pour son expertise. Ce fut une aventure professionnelle et également humaine, à cet égard, je tiens à remercier particulièrement Alberto PASANISI et Thibaut VITTE pour leur patience, leur intelligence. Ce fut vraiment une chance de vous avoir durant ces années !

Cette thèse a été rédigée grâce à des personnes qui ont su me consacrer du temps et m'envoyer des documents : Sandy ASARE, Gérard KRAUSS, Bruno PEUPORTIER, Nassim SAFER, Jean-Luc IZARD, Stéphane CITHERLET, Guillaume VARET, Pierre HOLMULLER, Jean BRAU, mais également Bernard LIPS et Roger PHAN TAN LUU pour leur conseils au niveau des plans d'expériences.

Plus qu'une thèse, ce manuscrit représente le point final d'une étape de ma vie. Et cette page fut certainement la plus difficile à écrire à cause de la peur d'oublier quelqu'un qui aurait par un moyen ou par un autre contribué à cet aboutissement. C'est pourquoi je finirai (presque !) en remerciant toutes les personnes qui ont eu le bonheur (ou le malheur !) de croiser ma route. Peut être que sans le savoir, d'un seul regard, d'un seul mot, ils ont changé ma vie, alors, à vous tous, MERCI.

Merci enfin et surtout à mes parents (Claudia et Pierre) et mon frère Patrice, à qui je dédie ce mémoire. Merci d'avoir toujours respecté mes choix, d'avoir toujours cru en moi, de m'avoir toujours soutenue et aidée durant ces longues années d'études. C'est aussi grâce à vous si j'en suis là aujourd'hui…

TABLE DES MATIERES

NOMENCLATURE

Symbole	Définition	Unité
Act	Activité des occupants	met
B_S, C_S et D_S	Coefficients dépendants de paramètres définis par les équations de fonction de transfert en z	-
Ci	Capacité thermique de la zone i	J/kg.K
c_p	Chaleur spécifique	J/kg.K
c_p	Coefficient de pression du vent	-
f_{sky}	facteur de vue du ciel	-
f_A, f_B, f_C et f_D	fréquences d'occurrence du nombre d'heures passées dans l'année dans les plages de confort A, B, C et D	-
g	Accélération de la gravité	m/s²
h_c	Coefficient de transfert de chaleur surfacique dans la lame d'air	W/m².K
h_e	Coefficient de transfert de chaleur surfacique extérieure	W/m².K
K	Coefficient de perméabilité de l'air (Cs dans TRNFLOW)	-
$\dot{m}$	Débit aéraulique	m³/h
n	exposant de l'écoulement d'air	-
N	Nombre de facteurs dans les plans d'expériences	-
Ne	Nombre d'expériences	-
$n_{occupants}$	Nombre d'occupants du bâtiment	-
ΔP	Différence de pression de part et d'autre de la fissure	Pa
Qr	Flux de chaleur à travers le vitrage	W
$Q_{lat,i}$	Energie latente prélevée (positive pour la déshumidification et négative pour l'humidification)	J
$\dot{Q}_{r,w_i}$	Gains radiatifs pour le nœud de température de surface du mur	W
$\dot{Q}_{g,r,i,w_i}$	Gains radiatifs internes reçus par le mur	W
$\dot{Q}_{sol,w_i}$	Gains solaires des fenêtres reçus par le mur	W
$\dot{Q}_{long,w_i}$	Rayonnement grande longueur d'ondes échangé entre le mur et les autres murs et les fenêtres	W
$\dot{Q}_{wall-gain}$	Flux spécifié par l'utilisateur à la surface de mur ou de fenêtre	W
$\dot{Q}_i$	Gain de chaleur net	W
$\dot{q}_{s,i}$	Flux de chaleur conductif du mur à la surface intérieure	W
$\dot{q}_{s,0}$	Flux de chaleur conductif du mur à la surface extérieure	W

Symbole	Définition	Unité
$\dot{q}_{comb,i}$	Flux de chaleur combiné radiatif et convectif	W
R	Réponse étudiée dans les plans d'expériences	-
Re	Nombre de Reynolds	-
s	Nombre d'états considérés pour chaque facteur	-
T_a	Température extérieure	K
T_{GR}	Température du sol	K
T_R	Température de la pièce adjacente	K
T_{fsky}	Température du ciel	K
$T_{outside}$	Température extérieure	K
T_{air}	Température de l'air	K
T_{vent}	Température de l'air provenant des équipements de ventilation	K
$T_{zone,i}$	Température de la zone i	K
T_0 et T_i	Températures de l'air dans chaque milieu	K
$T_{i,t-\Delta t}$	Température de la zone i au début du pas de temps	K
$T_{s,i}$	Température de la surface intérieure	K
$T_{s,0}$	Température de la surface extérieure	K
T_{ai}	Température d'air intérieur	K
T_{ae}	Température d'air extérieur	K
$T_{b,S}$	Température imposée en condition aux limites	K
T_i	Température au noeud i	K
ΔT	Différence de température entre l'intérieur et l'extérieur	K
Δt	Pas de temps de la simulation	S
u	Variable naturelle dans les plans d'expériences	-
u(0)	Centre de la variable dans les plans d'expériences	-
Δu	Pas de la variable dans les plans d'expériences	-
x	Variable codée dans les plans d'expériences	-
Xi	Paramètres des plans d'expériences	-
Δz	Variation d'altitude	M
Ti	Température de la zone i	K
$\dot{V}$	Débit volumique	m^3/s
$W_{g,i}$	Gains internes en humidité	$kg_{eau}/kg_{air\ sec}$
α_0	Exposant du profil de vitesse de vent au niveau du bâtiment	--
α_m	Exposant du profil de vitesse de vent à la station météo	-
α_{ijk}	Effets d'interaction du deuxième ordre dans les plans d'expériences	-
κ_i	Pente de l'isotherme de sorption du matériau dans le modèle d'humidité	-

Symbole	Définition	Unité
φ_{GLO}	Densité de flux radiatif de grande longueur d'onde	W/m²
φ_{CLO}	Densité de flux radiatif de courte longueur d'onde	W/m²
φ_{Conv}	Densité de flux convectif	W/m²
φ_{Cond}	Densité de flux conductif	W/m²
θ_{rm}	Température moyenne glissante du jour	K
θ_{rm-1}	Température moyenne glissante de la veille	K
θ_{ed-1}	Température moyenne journalière extérieure de la veille	K
θ_{ed-2}	Température moyenne glissante extérieure de l'avant-veille	K
τ	Taux de renouvellement d'air	Vol/h
ρ	Masse volumique de l'air	kg/m³

ABREVIATIONS

Symbole	Définition
ADEME	Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie
AFNOR	Association française de normalisation
AIE (IEA)	Agence Internationale de l'Energie (International Energy Agency)
AIVC	Air Infiltration and Ventilation Centre
ANAH	Agence nationale pour l'amélioration de l'habitat
ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers
ASPO	Association for study of peak oil
CAO	Conception assistée par ordinateur
CEREN	Centre d'études et de recherches économiques sur l'énergie
CETE	Centre d'études techniques de l'équipement
CLIP	Club d'ingénierie prospective Energie et Environnement
CSTB	Centre scientifique et technique du bâtiment
DAO	Dessin assisté par ordinateur
DGEMP	Direction générale de l'énergie et des matières premières
DGUHC	Direction générale de l'urbanisme, de l'habitat et de la construction
DJU	Degré jour unifié
DPE	Diagnostic de performances énergétiques
EAS	Échangeur air / sol
EASE	Education of Architects in Solar Energy and Environment
EDF	Électricité de France
FFB	Federation Française du Bâtiment
GIEC	Groupe intergouvernemmental d'experts sur le Climat
HBM	Habitations à bon marché
HLM	Habitations à loyer modéré
HPE	Haute performance énergétique
HQE	Haute qualité environnementale
MCP	Matériau à changement de phase
MEXPER	Méthode experte par les plans d'expériences en réhabilitation
MIES	Mission interministérielle de l'effet de serre
OPAC	Office public d'aménagement et de construction
PMV	Predicting Mean Vote
PREBAT	Programme de recherche et d'expérimentation sur l'énergie dans le bâtiment
PVC	Poly chlorure de Vinyle
REFLEX	Rénover Efficacement des Logements Existants
RT	Réglementation thermique
THPE	Très haute performance énergétique
TIM (MIT)	Transparent insulation material (matériau à isolation transparente)
VIR	Vitrage à isolation renforcée
VMC	Ventilation motrice contrôlée

RESUME

L'objet de ce travail de thèse est d'analyser la façon dont peuvent s'intégrer des dispositifs bioclimatiques sur un bâtiment existant par le biais des plans d'expériences pour un faible nombre de critères et, dans les autres cas, de l'analyse multicritères.
Les solutions proposées découlent, dans l'approche développée, d'une méthode mathématique permettant de définir les priorités d'interventions.
La conception bioclimatique se décline donc sous forme de stratégies d'hiver et d'été. Ainsi, face à ces stratégies, pour lesquelles le challenge à relever consiste à trouver un compromis entre des principes qui peuvent sembler contradictoires, des dispositifs sont examinés. Le but est d'exploiter au maximum les variations de la température extérieure, en jouant sur le déphasage entre celle-ci et la température intérieure.
Sur chaque élément du bâtiment, les différentes stratégies bioclimatiques associées sont listées ainsi que les dispositifs consubstantiels.
Comment installer et optimiser les dispositifs climatiques sur les bâtiments anciens ? Quels bâtiments choisir ?
Les données quantitatives sur la typologie des bâtiments construits avant la première réglementation thermique en 1974 étant difficilement accessibles, la catégorisation du parc de logement résidentiel français semble ardue sur l'ensemble du territoire. La méthodologie proposée est donc développée que sur des bâtiments de référence identifiés.
Les systèmes bioclimatiques sont retenus sur un bâtiment de référence à rénover dont on ne change pas la structure ni le positionnement des fonctions.
Au préalable, un état des lieux du bâtiment est effectué par une modélisation se rapprochant au mieux de la réalité. Ces premiers travaux mettent en exergue les limites de l'analyse de sensibilité au sens classique du terme, notamment lorsque les paramètres sont interdépendants. L'analyse des performances et du positionnement des solutions requiert en effet de se placer dans un nombre de situations qui devient pratiquement infini si l'on veut croiser tous les paramètres possibles. Aussi, le travail consiste à aborder ensuite la question par la méthode des plans d'expériences qui permet de réduire considérablement le nombre de cas à analyser et de trier les dispositifs par ordre d'efficacité. Le poids des facteurs (fenêtre, mur, toiture, etc.) sur le bâtiment est ainsi déterminé. Les plans d'expériences permettent de dresser un organigramme décisionnel énergétique en terme d'interventions sur le bâtiment.
Les actions efficaces sont alors identifiées sur les différents éléments du bâtiment : façades externes, parois internes, toiture, parois transparentes, plancher et la ventilation. Certaines actions sont sélectionnées par une méthode d'optimisation.
La méthodologie est mise en œuvre sur deux bâtiments de référence dont la modélisation thermo aéraulique est effectuée par TRNSYS[1] et TRNFLOW[2].
Les simulations réalisées aboutissent à des préconisations différentes selon la zone géographique. Autant dans le Nord des solutions répondant à la stratégie de froid sont obtenues et favorisent également le confort d'été telles que les fenêtres performantes, les matériaux à isolation transparents ou encore l'adjonction de serre ; autant en zone méditerranéenne, les préconisations d'hiver devront s'accompagner de solutions améliorant le confort d'été (association de fenêtres performantes à des protections adéquates ou encore amélioration de l'inertie). Les solutions réduisant les besoins en chauffage peuvent être généralisées sur le territoire. En revanche, en ce qui concerne le

[1] (TRNSYS, 2004)

[2] 5TRNFLOW, 2006) : TRNFLOW permet par ailleurs d'analyser les stratégies de ventilation naturelle favorisant l'amélioration du confort d'été.

confort d’été, les préconisations dépendent fortement de la typologie du bâtiment et du climat considéré.
Le dessein du travail de thèse a été d’aller au delà des études conventionnelles et de développer une méthodologie à appliquer à n’importe quel bâtiment permettant à l’homme d’études de comparer des solutions bioclimatiques avec un nombre minimum de simulations !
Cette analyse est donc finalement un point de jonction entre la thermique du bâtiment, l’architecture ainsi que des méthodes mathématiques (plans d'expérience, optimisation et analyse multicritères) qui apporte une plus value méthodologique.

Mots clés : Bioclimatique, besoins énergétiques, confort, rénovation, plans d’expériences, approche multicritères, optimisation, ventilation, inertie, protections solaires, échangeur air sol, simulation thermique.

ABSTRACT

This thesis's aim is to analyze how bioclimatic devices and schemes can be added to existing buildings, using experiences plans for a small number of criteria and the multiple criteria analysis for all the other cases.
Obtaining a more precise frame for the analysis enables us to say that for buildings erected in France before the first thermal regulations, we can propose a methodology including a tool to help the researcher make a decision, if not possible to draw a typology and to integrate specific renovation devices to this tool.
After making the inventory of bioclimatic strategies, in this thesis we made a synthesis taking into account both architectural and thermal aspects for new and old buildings. Moreover we proposed solutions relying on a mathematical method enabling to define where to start first.
Bioclimatic conception means making choices in winter and summer strategies. Several suitable schemes had to be examined, considering the strategies to establish, and the challenges to face, which consisted in making a compromise between contradictory principles (catch the light or protect oneself from it). The goal is to make use of the variations of the outside temperature at large by taking into account the gap between indoor and outdoor temperatures.
On each part of the building, the different bioclimatic strategies have been listed as well as the associated schemes.
How to install and improve climatic devices and schemes on old buildings? Which buildings to choose?
The numbers and data concerning the typology of buildings erected before the first thermal regulations in 1974 are hardly accessible. Thus it is difficult to draw a precise typology of French houses characteristics all over the country. Consequently the methodology proposed has been only developed on identified specific buildings.
We can now draw the outlines of the study: the passive systems are those that are chosen for a reference building to renovate but whose structure is not changed.
Before that, a check-up has been made for the building, using a model very similar to the real one. This first step revealed the limits of the sensitivity analysis, as it is classically known, in a situation where the parameters are interconnected. As a matter of fact, analyzing the way the solutions emerged and developed requires that we should study an almost unlimited number of situations if we ever want to make all possible parameters interact.
Consequently we have to deal with this issue using the experimental planning method. This method enables us to reduce the number of situations to analyze a lot. Using this method, we can also classify the devices starting with the most efficient one. Thanks to that, the effect of factors such as windows, walls, roofs and so on can be determined. The experimental planning permit us to draw a decision-making process chart to determine how to intervene on the building.
The efficient actions are defined according to the making-decision process method and they are identified on the different parts of the building: external façades, walls inside, roof, transparent separations, floor and wind flow. An optimization method enables to select some actions according to energetic and economical criteria.
This methodology has been used on two reference buildings. The software TRNSYS has been chosen because you can find many bioclimatic devices in its data bank. The air flow is taken into account thanks to the wind flow study software linked to TRNSYS: TRNFLOW.

The simulations made lead us to different recommendations according to the geographic zone. In the North, solutions taking into account the cold are chosen, solutions such as high performance windows, transparent isolating material or greenhouses, all of those solutions improve summer comfort as well. In the south, winter recommendations go with solutions improving summer comfort (high performance windows associated with adequate protections or improving inertia processes). Solutions reducing heating needs can be promoted and developed all over the country. But as far as summer comfort is concerned the recommendations strongly depend on the types of building and climate.
This thesis aimed at going beyond the conventional studies which consisted either in proposing a list of measures or studying a few cases. We also wanted to develop a methodology adapted to any building which could give the researcher the opportunity of comparing bioclimatic solutions using the smallest number of simulations.
Finally this analysis is a meeting point between building thermal science, architecture and mathematical methods (experience plan, optimization and multiple criteria analysis) that bring something new and different in the methodology.

Keywords: Bioclimatic, Energy requirements, Comfort, Renovation, Experimental planning, multiple criteria analysis, Optimization, Ventilation, Thermal mass, Shading devices, Air ground exchanger, Thermal simulation.

PLAN DE THESE

« Dans notre effort de compréhension du monde qui nous entoure, les progrès les plus décisifs ne sont pas, contrairement à ce que l'on croit facilement, les réponses trouvées à nos questions, mais la formulation des questions plus pertinentes ou mieux posées. »

Albert Jacquard

Cette phrase a été le fil directeur des recherches effectuées dans le cadre de cette thèse. La question de départ résonnait comme un écho : « Par quel biais prendre le sujet ? »

Il était nécessaire au préalable de s'imprégner du terme « bioclimatique ». Ce faisant, on peut vite tomber dans des approches purement architecturales ! Comment se raccrocher à la physique des phénomènes ? Cette citation a pris tout son sens quand l'étude s'est orientée vers l'approche méthodologique. La difficulté était en effet de définir la façon d'installer les dispositifs climatiques sur les bâtiments anciens[3] et de savoir ensuite comment les optimiser. Quels bâtiments choisir ? Une grande partie de la première année de thèse s'est passée en tentant de définir une typologie de ces bâtiments anciens représentative du parc de logement français. Force est de constater, et cet aspect est souligné dans la littérature, que les données quantitatives sont difficilement accessibles.

Il s'est donc avéré évident de rendre la méthode la plus didactique possible afin qu'elle soit applicable sur n'importe quel bâtiment.

La méthodologie consiste à effectuer un état des lieux du bâtiment par une modélisation se rapprochant au mieux de la réalité. Sur ce modèle de bâtiment, les plans d'expériences, qui consistent à déterminer le poids des facteurs (fenêtre, mur, toiture, etc.) sur les besoins énergétiques et le confort d'été bâtiment, sont appliqués. Ils permettent de dresser un organigramme décisionnel en terme d'interventions sur le bâtiment. A cette étape, par une approche mathématique, il est possible de déterminer quels sont les éléments à rénover en priorité. Chaque élément ayant été associé à des dispositifs climatiques spécifiques, il est alors possible de choisir certains dispositifs par une optimisation énergétique. Cette étape répondant surtout à l'attente industrielle d'EDF R&D.

Finalement, sur un bâtiment de référence, dont on ne change pas la structure, construit avant la première réglementation thermique, des solutions bioclimatiques sont proposées. Pour ce faire, le bâtiment est décomposé en éléments (mur, fenêtre, toiture, ventilation, plancher). Les éléments sont ensuite priorisés en terme énergétique et de confort par les plans d'expériences qui ont l'avantage de réduire le nombre de simulations à réaliser. L'homme d'études associe ensuite les solutions aux bâtiments. Le dimensionnement de certaines solutions est déterminé par une méthode d'optimisation basée sur des aspects énergétique. Les solutions proposées sont ensuite comparées. La méthodologie présentée est ensuite appliquée sur deux bâtiments de référence. En perspectives, la prise de conscience des phénomènes liés à l'environnement et à la santé (qualité de l'air notamment), pousse à intégrer ces préoccupations de façon à ce que le décideur prenne une décision basée sur d'autres critères qu'énergétiques.

---

[3] Dans le langage courant, les bâtiments dits anciens sont les bâtiments construits avant 1975, date de mise en place de la première réglementation énergétique. Les bâtiments dits récents sont ceux construits depuis 1975. En revanche, certains auteurs à obédience architecturale (comme (Joffroy, 2005)) différencient plusieurs typologies au niveau des bâtiments construits avant la première réglementation thermique de 1974, dont les « logements anciens » construits avant la première guerre mondiale (1914). Pour cette dernière catégorie, nous spécifierons explicitement, afin qu'il n'y ait pas d'ambiguïté, le terme « logement ancien ».

Afin de répondre à cet objectif, nous avons développé l'outil d'aide à la décision REFLEX-Bio : *R*énover *Ef*ficacement des *L*ogements *Ex*istants par des solutions *Bio*climatiques. Au préalable, le contexte et les objectifs sont rappelés.

1. INTRODUCTION GENERALE

L'amélioration de l'efficacité énergétique des bâtiments existants s'impose comme une nécessité : le contexte en rappelle les tenants et les aboutissants (§ 1.1). Les enjeux (§ 1.2) ainsi que les objectifs à atteindre au niveau de cette étude sont ainsi mentionnés (§ 1.3). L'énergie la moins chère étant celle qui n'est pas consommée, cette étude se focalise sur les solutions bioclimatiques. L'homme d'études souhaitant proposer des solutions bioclimatiques de rénovation sur un bâtiment est amené aujourd'hui soit à réaliser un grand nombre de simulations, soit à proposer des solutions découlant de son expérience (de façon intuitive), soit à tester une solution au hasard parmi un catalogue de solutions, soit encore à ne rien faire. Si toutes les solutions étaient à tester, on aboutirait à une explosion combinatoire du nombre de simulations. Ainsi pour N facteurs à étudier, le nombre de simulations à réaliser est de 2^N. Par ailleurs l'interprétation des résultats n'est pas toujours aisée. Les outils systématiques d'exploration de toutes les solutions sont rares. La problématique est : comment éviter cette explosion combinatoire et obtenir une analyse pertinente quand on veut tester plusieurs solutions ?

Pour y parvenir, un état de l'art des solutions et des méthodologies existantes a été réalisé, il est présenté dans la deuxième partie (cf. § 2). Cette partie inclue les stratégies et les solutions climatiques subséquemment associées et d'autre part leur niveau de rénovation. L'état de l'art met en exergue qu'il est nécessaire de développer une méthodologie permettant d'inclure des solutions bioclimatiques sur un bâtiment existant et non coûteuse en temps de calcul. Afin de limiter le temps de calcul et par conséquent le nombre de simulations, la méthode des plans d'expériences est exploitée (§ 3). Les bases posées, nous avons développé la méthodologie MEXPER[4] (§ 4) qui est ensuite décrite. Cette méthodologie est ensuite mise en œuvre (§ 5) et appliquée (§ 7) sur des bâtiments de référence construits avant 1975.

1.1. Contexte

La consommation d'énergie dans l'habitat est à l'origine d'émissions importantes de gaz à effet de serre et pèse lourd dans le budget des ménages. La rénovation thermique des logements est la priorité en France. Par sa taille (2 milliards de m² dans le résidentiel soit près de 29,3 millions de logements) et par ses impacts. Les bâtiments construits avant 1975 sont en effet très énergivores et peuvent représenter un certain nombre de risques sanitaires. La réduction de la consommation énergétique est un défi qu'il est nécessaire de relever à plusieurs titres :

- **Environnemental :** Des préjudices sont provoqués à tous les stades de transformation de l'énergie : pollution de l'air, risques de changements climatiques, déforestation, pluies acides, production de déchets dangereux sans solution de traitement aujourd'hui ((Giec, 2007), (Aspo, 2007)).

[4] Méthode experte par les plans d'expériences en réhabilitation.

- **Social et sanitaire :** L'environnement construit constitue un support déterminant du bien-être et des relations sociales. L'environnement intérieur a un impact direct sur la santé des occupants, ceci d'autant plus qu'un européen moyen passe 80% de son temps dans des espaces bâtis (Epfl[5], 2005).

- **Economique :** Symbole du succès de la civilisation productiviste héritée de la révolution industrielle, la construction nécessite des investissements très élevés : de 10 à 12% du produit national brut, selon les pays (Laponche, 2004). Le secteur du bâtiment génère une part importante des emplois, dans les seuls pays de l'Union Européenne. (Platat, 2007) note même que, dans le secteur du bâtiment, on peut compter, d'après les estimations de l'ADEME, sur 100 000 emplois nouveaux en France si un grand plan de rénovation des bâtiments existants est lancé.

- **Politique :** la diminution des quantités de pétrole disponible va entraîner des bouleversements importants qu'il est nécessaire d'anticiper (Aspo, 2007).

La production d'énergie est la cause principale des risques de changement climatique dus à une augmentation des gaz à effet de serre. Ce phénomène est clairement corrélé à l'activité humaine pour ce qui concerne la deuxième moitié du 20ème siècle. En effet, Météo France a constaté une augmentation moyenne de la température en France de l'ordre de 1°C au cours du siècle passé et l'un des scénarii probables prévoit une augmentation de 4°C d'ici un siècle environ ((Giec, 2007), (Manicore, 2007)). Dans l'espoir de limiter ce réchauffement à 2°C à l'horizon de 2100, le GIEC[6], réseau mondial de chercheurs créé par l'Organisation des Nations Unies, préconise de ramener au plus vite à 2 tonnes par an et par habitant les émissions, ce qui revient à diviser par quatre les émissions de gaz à effet de serre pour la France. Ceci s'inscrit dans la lignée du protocole de Kyoto qui oblige à diviser par plus de quatre la consommation d'énergie domestique pour atteindre, d'ici à 2050, une moyenne de 50 kWh d'énergie consommée par m² par an.

Diviser par deux les émissions de gaz à effet de serre à l'échelle de la planète nécessite en pratique de diviser par quatre celles des pays industrialisés. Comment ces objectifs globaux se déclinent-ils au niveau national ?

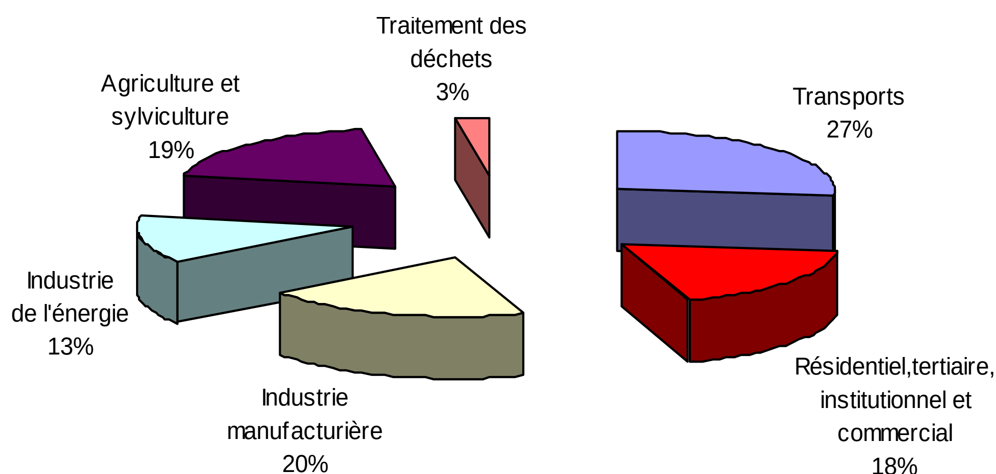


Figure 1. Emission des gaz à effet de serre par secteur en France en 2003 (Mies, 2005)

5 (Epfl, 2005) Bases du développement durable, Cours de mise à niveau du Master en Architecture et Développement Durable, moodle.epfl.ch/mod/resource/view.php?inpopup=true&id=71321, 2005

6 Groupe intergouvernemental d'experts sur le climat.

Afin de déterminer des moyens de remplir cet objectif, il est nécessaire d'examiner le profil de répartition des émissions de gaz à effet de serre de la France (cf. Figure 1). L'évolution sur plusieurs années de ce profil (de 1975 à 2000) montre une très forte augmentation des émissions dues au transport et au résidentiel tertiaire, contrairement aux autres secteurs dont les émissions sont en diminution. Cette augmentation des émissions du secteur résidentiel tertiaire est en grande partie liée au fort développement de l'électroménager et des équipements informatiques. Ainsi, malgré une progression forte de la performance thermique moyenne des bâtiments due à la réglementation de la construction neuve et la réhabilitation d'une partie du parc existant (la consommation moyenne d'un logement passe de 372 kWh/(m².an) en 1973 à 245 kWh/(m².an) en 2003), la progression de la surface de logement par habitant et l'augmentation du parc résidentiel et tertiaire font que la consommation finale d'énergie dans le bâtiment a progressé en volume de 24 % entre 1973 et 2004 (Prebat, 2006).

Pourquoi les bâtiments sont-ils si « énergivores » ? Selon (Les amis de la terre, 2007), la plus grande partie des logements a été construite à une période pendant laquelle le coût de l'énergie était très bas, et le souci de l'environnement inexistant. Les constructions des années 50 et 60 ont une très mauvaise performance énergétique. La première réglementation, qui date de 1974 et est consécutive au premier choc pétrolier, impose une performance énergétique minimale des constructions neuves. Les normes sont actualisées tous les 5 ans environ. En revanche, même si la réglementation a stabilisé la consommation d'énergie, elle ne l'a pas diminuée. Dans le même temps, différents labels d'efficacité énergétique et les décisions du Grenelle de l'Environnement se mettent en place et constituent les objectifs fixés dans cette étude (cf. 1.3).

Une diminution par quatre de la consommation énergétique implique un effort d'économies d'énergie dans chacun de ces secteurs. Au niveau individuel, un ménage français peut agir directement sur ses consommations d'énergie au niveau de son habitation en appliquant des mesures correctes d'efficacité énergétique.

Les différentes réglementations thermiques tendent à répondre à cette problématique. Ainsi, depuis 25 ans, cinq réglementations ont permis une réduction de deux tiers des émissions dans les bâtiments neufs. Les logements neufs consomment aujourd'hui 60% d'énergie en moins à confort équivalent par rapport à 1974. Cela représente 75% des économies d'énergie réalisées en France depuis 1975 (Aulagnier *et al*, 2005) (cf. Tableau 1). Par ailleurs, si les réglementations successives ont durci les exigences thermiques concernant le bâti, en revanche, il n'y a pas eu d'élément nouveau en matière de débits de renouvellement d'air depuis la loi sur l'air de 1982.

Dans la réglementation thermique 2005, les propriétaires peuvent installer ou remplacer des équipements dont les performances sont supérieures à celles exigées par la réglementation et peuvent ainsi bénéficier d'aides financières incitatives dans le cadre des Certificats d'Economie d'Energie négociés avec les distributeurs d'énergie. Ce dispositif permet de financer des économies d'énergie très diffuses, notamment celles réalisées par les particuliers dans leur habitat. Ce marché de certificats doit permettre la réalisation des actions au moindre coût pour les vendeurs d'énergie et donc pour les consommateurs. Selon (DGEMP, 2007), le principe des certificats d'économie d'énergie repose sur une obligation de réalisation d'économies d'énergie imposée par les Pouvoirs publics sur une période donnée aux vendeurs d'énergie comme EDF[7].

[7] L'arrêté du 26 septembre 2006 (Ministère de l'Economie, des finances et de l'industrie, 2006) fixe la répartition par énergie de l'objectif national d'économies d'énergie (54 TWh) pour la période du 1er juillet 2006 au 30 juin 2009. Si les vendeurs d'énergie ne parviennent pas à remplir leurs obligations dans le temps imparti, ils devront s'acquitter d'une pénalité libératoire.

Tableau 1. Evolution de la Réglementation thermique (RT) en France (de l'auteur)

Années	Caractéristiques
1974	L'objectif est de répondre rapidement à l'augmentation du prix de l'énergie Pour ce faire cette réglementation consiste à calculer un coefficient G de déperditions globales à travers l'enveloppe sans se préoccuper des consommations. Applicable aux bâtiments neufs
1982	Les besoins de chauffage déduisent désormais des déperditions globales les apports solaires et internes (coefficient B). Applicable aux bâtiments neufs
1988	Alors que jusqu'à présent, on parlait uniquement de besoins, on caractérise désormais les consommations, en tenant compte des rendements des systèmes via le Coefficient C . Applicable aux bâtiments neufs
2000	Elle s'exprime sous forme de performances à atteindre. Une consommation de référence est établie. La consommation du bâtiment étudié doit être inférieure à la consommation de référence ou à des performances minimales (garde-fous). Applicable aux bâtiments neufs
2005	Il y a la RT 2005 pour le neuf, et en plus, pour l'existant on voit apparaître les premiers textes : Elle renforce les exigences de performances minimales lors du remplacement de composants de l'enveloppe ou d'équipements énergétiques. Elle impose également, pour les opérations importantes, des études préalables de solutions durables. Ces études seront prescrites à partir du 1er janvier 2008 dans le neuf et du 1er avril 2008 pour les réhabilitations lourdes. Enfin, les bâtiments publics d'une certaine taille devront afficher un diagnostic de performance énergétique à partir du 2 janvier 2008.

Un fort potentiel d'économies d'énergie est possible dans le patrimoine bâti notamment dans les bâtiments datant d'avant la première réglementation thermique de 1974. Ces bâtiments sont très « énergivores » et leur consommation d'énergie est estimée à 1,6 fois plus grande que celle des bâtiments neufs (Orselli, 2005).

Par ailleurs, contrairement à une idée largement répandue, rappelons que le chiffre de 1 à 1,5% n'est pas le taux de renouvellement du parc. Il comprend d'une part l'accroissement du parc et d'autre part le renouvellement proprement dit, lié à la destruction d'une fraction du parc existant. Pour le résidentiel, le renouvellement du parc, lié à la destruction de logements, ne représente qu'environ 3 pour mille du parc existant (Prebat, 2006) – 0,1 à 0,2% par an selon les chiffres du Grenelle. Il est donc urgent de se focaliser sur la rénovation durable des bâtiments anciens, et c'est ce qu'initie la nouvelle réglementation thermique, RT 2005, qui pour la première fois donne des préconisations pour l'habitat existant. Malgré une évolution certaine, la nouvelle réglementation RT 2005 se limite au bâtiment de plus de 1000m² faisant l'objet de travaux de réhabilitation importants. Le décret prévoit une mise en application de cette obligation le 1er avril 2008. Pour les bâtiments inférieurs à 1000 m², la réglementation est à appliquer élément par élément : des exigences de performances minimales sont imposées lors du remplacement de composants de l'enveloppe (fenêtres, isolation thermique) ou d'équipements énergétiques, depuis le 1er novembre 2007. Son objectif est de faire disparaître du marché les produits de construction ou équipements techniques obsolètes en terme de performances énergétiques, afin de privilégier la diffusion la plus large possible dans le parc existant, des meilleurs produits disponibles, et d'impulser une rénovation dans les bâtiments de grande taille.

Ceci étant, on peut souligner quelques limites de cette réglementation : la nature des matériaux a utiliser n'est pas précisée et il n'y a pas de préconisations sur les techniques de construction et de rénovation à privilégier.

Un autre dispositif juridique a été développé pour les bâtiments existants : le diagnostic de performance énergétique (DPE) (Ministère du logement et de la ville, 2007). La notion de diagnostic de performance énergétique des bâtiments est issue de la directive européenne sur la performance énergétique des bâtiments ((EurLex, 2003), (CEN, 2006a,b), (Conseil_Européen, 2002)) qui vise à donner un cadre européen aux politiques nationales de réduction des consommations d'énergie des bâtiments existants et à construire, dans la perspective de la mise en œuvre du protocole de Kyoto.

Le diagnostic de performance énergétique a pour objectifs pour le futur propriétaire ou le futur locataire (Ademe, 2006) :

- D'informer sur la consommation énergétique du logement et le coût moyen de celle-ci.
- De sensibiliser aux conséquences de sa consommation en énergie sur le climat de notre planète, en repérant cette consommation et les émissions de CO_2 qui en résultent, d'une part sur une étiquette « énergie » et d'autre part sur une étiquette « climat », suivant une échelle de A (logement économe) à G (logement énergivore).
- De donner des conseils pour maîtriser sa consommation sous forme de recommandations de gestion et de comportement; et au futur propriétaire des recommandations de travaux d'économie d'énergie ou de lutte contre l'effet de serre.

Parallèlement à la réglementation et au DPE, plusieurs initiatives ont éclos en France sur le modèle des voisins européens, nous en relevons quelques unes :

- Le label HPE (Haute Performance Energétique) : prévu à l'article R.111-20 du code de la construction et de l'habitation atteste la conformité des bâtiments nouveaux à un référentiel qui intègre les exigences de la réglementation thermique, le respect d'un niveau de performance énergétique globale de ce bâtiment supérieur à l'exigence réglementaire et les modalités minimales de contrôles. Il comporte deux niveaux correspondant à une consommation conventionnelle d'énergie inférieure : soit de 8% à la consommation conventionnelle de référence définie à l'article 8 de l'arrêté du 29 novembre 2000 précité, le label « haute performance énergétique » est alors appelé «Label haute performance énergétique, HPE 2000 » ; soit de 15% à la consommation conventionnelle de référence définie à l'article 8 de l'arrêté du 29 novembre 2000 précité, le label « haute performance énergétique » est alors appelé « Label très haute performance énergétique, THPE 2000». Dans la RT2005, le label HPE est associé à une réduction de 10% de la consommation de référence et le label THPE à une réduction de 20%.
- La démarche Haute Qualité Environnementale (HQE) : démarche de "management de projet" visant à limiter les impacts d'une opération de construction ou de réhabilitation sur l'environnement tout en assurant à l'intérieur du bâtiment des conditions de vie saines et confortables. Le niveau énergétique limite les projets à une amélioration comprise entre 10 et 20% en dessous de la consommation de référence de la RT 2005, ce qui est loin des exigences Passivhaus, Minergie, Effinergie qui sont à 50% de réduction (EnviroBat, 2007).
- Certification Effinergie : depuis 2005, son objectif est de créer une dynamique en France autour des constructions et réhabilitations basse énergie. Inspiré par les enseignements d'une étude CSTB / PREBAT et par le succès d'initiatives type PASSIVHAUS® (Allemagne) et Minergie® (Suisse), ce groupe de travail s'est formalisé en 2006 par la création du « Collectif Effinergie ». Ce collectif a défini avec la DGUHC (Direction générale de l'urbanisme, de l'habitat et de la construction) le niveau de la basse énergie (ou basse consommation énergétique) pour le neuf (arrêté du 8 mai 2007 relatif au contenu et conditions d'attribution du label « haute performance énergétique » publié au Journal Officiel du 15 mai 2007). Pour l'existant, une offre correspondante est planifiée pour la fin de l'année 2007.

Le chantier des bâtiments existants est d'ailleurs d'actualité avec le Grenelle de l'environnement lancé par le gouvernement qui projette « d'engager le chantier ambitieux de rénovation des bâtiments, afin de réaliser des économies d'énergie de 20% dans les bureaux et de 12% dans les logements privés d'ici à cinq ans, et d'un tiers d'ici 2020, a indiqué le climatologue Jean Jouzel » cité par (Le Nouvel Observateur, 2007). Relevons quelques décisions pour le secteur du bâtiment : l'évolution très rapide des réglementations des bâtiments neufs, le doublement des bâtiments anciens privés rénovés chaque année et la réhabilitation de 400 000 logements dégradés par an.

Les différents labels d'efficacité énergétique et les décisions du Grenelle de l'Environnement qui se mettent en place peuvent constituer un catalyseur pour la mise à niveau, voire le dépassement des enjeux et objectifs fixés par la suite.

1.2. Enjeux

La consommation des bâtiments représente près de la moitié de l'énergie utilisée en France, avec plus de 100 Mtep/an et entraîne plus de la moitié des dépenses. Il importe avant tout de poursuivre vigoureusement les économies d'énergie réalisées dans les bâtiments existants avant 1975 ou construits avec des normes insuffisamment durcies dans les années 1975-1995 (cf. Figure 2). En effet, la destruction des immeubles, extrêmement lente en France, aura peu d'effet, même à long terme.

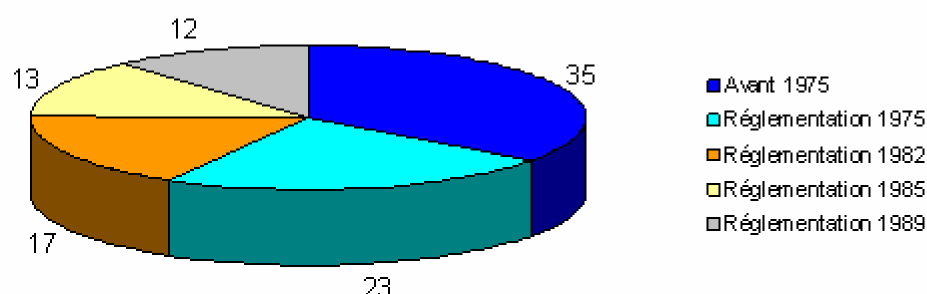


Figure 2. Part de la consommation de chauffage des logements en fonction de la période de construction en % (Ceren, 2004)

1.2.1. Chiffres clés de la consommation du bâtiment résidentiel en France

Selon l'Observatoire de l'énergie (Ministère de l'industrie, 2004), en 2002, les maisons individuelles consomment relativement plus d'énergie pour leur chauffage que les immeubles collectifs, ce qui tient aussi bien à leur taille qu'à leurs conditions d'isolation thermique (elles ont aussi plus de surfaces déperditives). Les immeubles sans chauffage collectif (avec ou sans chauffage central) ont une consommation relative nettement plus faible que les immeubles avec chauffage collectif : alors qu'ils représentent 24,3% des logements, ils ne consomment que 11,5% de l'énergie dédiée au chauffage (Ministère de l'industrie, 2005). Ces données montrent que les logements anciens représentent l'enjeu en

matière de réduction des consommations de chauffage avec environ 70% de la consommation totale de chauffage. Par ailleurs, les maisons individuelles anciennes avec environ 47% de la consommation de chauffage peuvent être identifiées comme une priorité en matière d'économies d'énergie.

Tableau 2. Répartition des résidences principales par tranche d'age et consommations énergétiques finales (Climat normal 2002) (Ademe, 2005)

	Ancien (1)		Récent (2)		Neuf (3)
	Parc (millions de logements)	Consommation (TWh)	Parc (millions de logements)	Consommation (TWh)	Parc (millions de logements)
Maisons individuelles	9,1	192,6	4,9	92,5	0,22
Immeubles Collectifs	6,8	123,6	3,7	43,3	0,10
Total	15,9	316,2	8,6	135,8	0,32
(1) : Les bâtiments dits anciens sont les bâtiments construits avant 1975, date de mise en place de la première réglementation énergétique. Les bâtiments dits récents sont ceux construits depuis 1975.					
(2) Ces bâtiments anciens et récents sont, dans leur totalité, qualifiés de bâtiments existants et constituent le stock actuel de bâtiments.					
(3) Les bâtiments neufs sont ceux construits au cours de l'année écoulée. Ils représentent le flux annuel de construction, soit en moyenne de l'ordre de 300 000 logements et 12,4 millions de m² de bâtiments tertiaires chauffés (valeur moyenne 1990-2002 de la construction neuve chauffée ou climatisée).					

1.2.2.Enjeux liés au choix des bâtiments anciens

Insistons sur le fait que les véritables gaspilleurs d'énergie sont les bâtiments anciens, c'est là que les pertes d'énergie sont les plus importantes. Dans les bâtiments existants, le plus gros potentiel d'économies d'énergie réside dans l'enveloppe (Orselli, 2005). L'expérience montre que les immeubles anciens présentent souvent de gros défauts thermiques.

De manière générale, la rénovation d'un bâtiment ancien concorde avec l'apparition de désordres graves, tels que des fuites dans la toiture, des fissures dans les façades dégradées par les intempéries, ou encore quand des moisissures apparaissent à l'intérieur. La rénovation intervient donc souvent trop tard et de manière trop ponctuelle, sans réflexion globale.

Une réhabilitation globale bien pensée et réalisée à temps est payante pour éviter les dommages à la construction et les dégâts qu'ils entraînent, croître la durée de vie des différents éléments de construction, augmenter le confort, améliorer le climat ambiant, assurer des températures équilibrées à l'intérieur de la maison, réduire les nuisances sonores, utiliser des matériaux de construction mieux tolérés par les habitants, créer des pièces plus claires recevant plus de lumière du jour, contribuer à améliorer la structure sociale du quartier ou encore revaloriser le quartier . Elle est aussi utile pour améliorer l'aspect du bâtiment, préserver et augmenter la valeur de l'immeuble et réduire les frais énergétiques et les charges, accroître l'indépendance en matière de politique énergétique, de politique des prix, des impôts et des taxes. Elle peut aussi améliorer la qualité de vie pour les habitants, permettre une meilleure exploitation des volumes : réduire les pertes d'énergie dans le bâtiment, éliminer les ponts thermiques, diminuer la consommation d'énergie, optimiser le bilan énergétique, utiliser parcimonieusement les ressources énergétiques, lutter contre la pollution de l'environnement.

Ont été montrés ici les enjeux d'une « réhabilitation », nous avons également employé le terme « rénovation » : de quoi parle t-on ?

1.2.3.Les différents niveaux de rénovation

(Orselli, 2005) montre la difficulté de caractériser les types de rénovations et la complexité de ses acteurs. Ainsi, on y découvre que les principales opérations d'économies d'énergie se font par de la « rénovation diffuse », liée à l'obsolescence de deux grands groupes de composants du bâtiment : les vitrages et huisseries (40 % des travaux) et les chaudières (40 % des travaux). L'application de concepts généraux comme celui de « réhabilitation » ou de « rénovation » au domaine énergétique doit se faire de façon très prudente.

Comme précisé par ailleurs, bien que les termes « réhabilitation », « rénovation » ou encore « entretien » n'aient pas de définitions précises, et que l'un ou l'autre des deux premiers soit utilisé dans le sens le plus général, (Orselli, 2005) distingue :

- la « réhabilitation » qui suppose des travaux extrêmement lourds, notamment de gros œuvre, sur l'ensemble d'un immeuble, généralement collectif, et dont l'application au secteur pavillonnaire est peu pertinente
- la « rénovation », qui peut consister à la remise en état d'un logement individuel ou situé dans un immeuble collectif, sans intervention majeure sur le gros œuvre
- la « rénovation diffuse » constituée de toutes les interventions partielles étalées dans le temps : changement de chaudière, changement de fenêtres ou d'huisseries, interventions sur les toitures, réfection de façade, etc.
- les travaux « d'entretien » sont difficiles à définir. L'entretien des installations consommant de l'énergie est surtout important dans le cas des chaufferies. Ils se distinguent parfois mal des travaux de rénovation diffuse.

On conçoit que les distinctions ci-dessus, aux définitions floues, ne permettent pas des statistiques précises.

En outre, on ne dispose pas d'éléments détaillés sur la répartition entre les quatre types d'intervention ainsi définis. Mais, les donneurs d'ordre du secteur global de la réhabilitation des logements, entendu dans le sens le plus général de « travaux sur un bâtiment existant » sont assez bien connus. La Figure 3 illustre leur répartition en volumes.

En considérant la répartition entre la « réhabilitation », la « rénovation » complète d'un logement, et la « rénovation naturelle diffuse » définies ci-dessus, on ne peut qu'émettre des conjectures : la « réhabilitation » d'immeubles, limitée en pratique aux gros bailleurs privés et aux HLM concerne probablement moins de 10 % du total et les « rénovations » complètes d'un logement et la « rénovation naturelle diffuse » se partagent les 90 % restant.

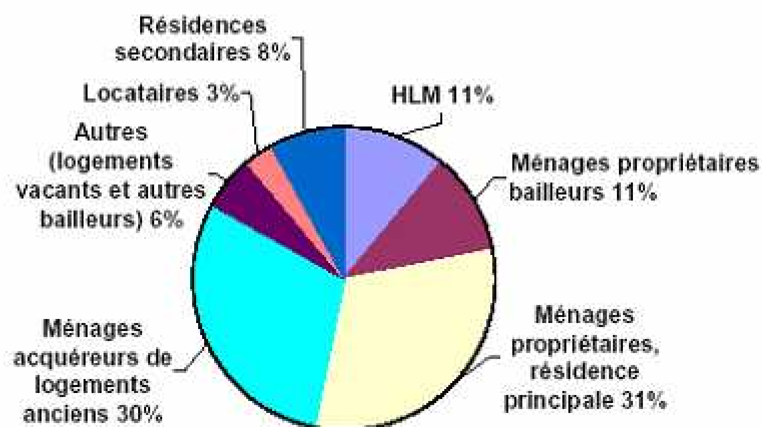


Figure 3. Travaux sur les logements existants par types de propriétaires (Orselli, 2005)

La « rénovation naturelle diffuse » constitue le principal mode de réalisation d'économies d'énergie.

En effet, les éléments ci-dessus concernant l'ensemble des travaux sur les bâtiments ne peuvent que donner une idée de la répartition de ceux concernant les économies d'énergie (installation de chauffage, chaudières, fenêtres et huisseries, isolation). Pour ces derniers, divers éléments permettent de penser que la « rénovation d'ensemble d'un logement » est très minoritaire par rapport à la « rénovation naturelle diffuse » limitée à un seul élément du logement. Ces opérations de « rénovation naturelle » se feraient de toute façon, les composants du bâtiment ou les appareils rénovés étant en fin de vie. Elle est « diffuse » parce que les acheteurs se décident librement et qu'aucune planification n'intervient.

Une enquête annuelle de l'ADEME analyse les travaux ayant un caractère énergétique dans les logements existants. Elle prend en compte aussi bien la « rénovation d'ensemble d'un logement » que la « rénovation naturelle diffuse ». Elle montre que les dépenses faites dans le cadre d'une « rénovation d'ensemble du logement » sont très minoritaires par rapport aux travaux diffus portant uniquement sur les composants concernant les économies d'énergie. La « rénovation diffuse » concernant les économies d'énergie se répartit, en valeur, ainsi selon l'enquête : à hauteur de 40 % pour le renouvellement des huisseries et vitrages extérieurs, 40 % pour le remplacement des chaudières et brûleurs en panne irréparable ou totalement obsolètes, 10 % pour les isolations[8] et 10 % pour tout le reste : étanchéité à l'air (joints de fenêtres), régulations, programmations, interventions sur les appareils terminaux de chauffage (radiateurs), etc.

La fréquence de ces travaux est faible : l'enquête indique que chaque ménage prend des décisions «importantes» (ne concernant pas que des travaux d'entretien) tous les 15 ans environ. Signalons que cette enquête exclut les dépenses concernant l'électricité spécifique et notamment l'éclairage et les services des immeubles, et prend très mal en compte la production d'eau chaude sanitaire.

8 Valeur surévaluée, car l'enquête prend en compte une trop forte partie de la dépense de réfection de façade ou de toit et non le seul surcoût d'isolation.

1.3. Déclinaison du facteur 4 en objectifs à atteindre

Les objectifs sont de plusieurs ordres : réduction des besoins de chauffage mais également l'amélioration du confort d'été sur un bâtiment existant. Ils peuvent être atteints par l'installation de solutions bioclimatiques. La finalité étant de proposer une méthodologie permettant de les identifier en un minimum de simulations.

1.3.1. Réduction des consommations

L'Union Européenne s'est fixée l'objectif « 20/20/20 » en 2007 : par rapport à 1990, il doit y avoir, d'ici 2020, une réduction de 20% des émissions des GES (30% si d'autres pays s'engagent), une amélioration de 20% d'efficacité énergétique et 20% de la consommation d'énergie doit être couverte par les énergies renouvelables. Ce qui se traduit par la feuille de route dans l'habitat ancien par rapport à 2007 de -12% de réduction des consommations en 2012 et de –38% en 2020 :

- en 2007, la consommation moyenne d'énergie est de 240 kWh/m²/an
- en 2012, elle devra passer à 210 (-12%)
- en 2020, à 150 (-38%)
- en 2050, entre 50 et 70 (au niveau de l'étiquette B du DPE).

(Courgey *et al*, 2006) notent que pour atteindre le « facteur 4 » d'ici 2050, il faut d'ores et déjà tout construire et tout réhabiliter en « basse énergie » et ils s'interrogent sur l'inadéquation entre la réglementation et autre « plan climat » et les défis environnementaux à tenir. Si une réglementation impose des niveaux minimum, elle n'empêche nullement les acteurs quels qu'ils soient, et c'est ce que propose le Grenelle, de faire mieux et de prendre des initiatives. Les auteurs proposent un comparatif entre les exigences réglementaires et les référentiels existants repris dans le tableau suivant :

Tableau 3. Objectifs à atteindre pour les bâtiments antérieurs à 1975 (U en W/m².K) (Courgey *et al*, 2006)

Type de parois	RT 2000	RT 2005	Basse Energie	Très basse énergie
Murs en contact avec l'extérieur	0,47 à 0,4	0,4 à 0,36	0,2	0,13
Planchers hauts	0,3 à 0,23	0,25 à 0,2	0,13	0,1
Surface de plancher bas	0,43 à 0,3	0,36 à 0,27	0,2	0,13
Baies vitrées	2,6 à 2	2,1 à 1,8	1,5	0,8

Dans cette étude, les préconisations du label Basse Energie sont exploitées en tant qu'objectifs à atteindre pour les bâtiments à rénover. Concrètement, ces objectifs correspondent à diminuer la consommation d'énergie par 4 par rapport au niveau actuel. A quoi correspond ce facteur quatre dans les bâtiments existants ?

Tableau 4. Objectifs de chauffage à atteindre pour les bâtiments antérieurs à 1975 (en kWh d'énergie primaire par m² habitable)

Usage	Consommation (Ministère de l'industrie, 2004)	Valeur cible
Chauffage kWh/m²/an	328	82

(Sidler, 2003) détermine les valeurs cibles sur la consommation de l'ensemble du parc de logements français actuel, et les évalue à 50 kWh/m²/an (bâtiments anciens et neufs). Le label Minergie en Suisse propose une consommation de chauffage de 15 kWh/m²/an pour les bâtiments neufs et l'atteint dans certaines configurations. Il semble intéressant de différencier pour les valeurs cibles à atteindre : les bâtiments neufs, dans lesquels on dispose d'une plus grande marge de manœuvre, et le parc de bâtiments anciens. Un facteur 4 de réduction dans chacun de ces secteurs a été distingué, et on obtient une valeur cible d'environ 80 kWh/m²/an pour les consommations en chauffage. Cette valeur correspond aux objectifs fixés par le Grenelle de l'environnement en 2007 et qui devrait donner lieu à une loi votée en 2008, qui comporte une rénovation thermique obligatoire et un seuil de consommation des bâtiments de 80 kWh/m²/an.

Pour mettre en œuvre le plan national de rénovation thermique, il est nécessaire que tous les secteurs du bâtiment s'attèlent à la tâche.

L'énergie la moins chère étant celle qui n'est pas consommée, nous allons tenter d'identifier les principes de conception et de rénovation favorisant les économies d'énergie. Nous les situerons dans un contexte architectural et présenterons également les modèles associés.

Si une seule technique d' « énergies renouvelables » était à conseiller, ce serait certainement l'architecture bioclimatique. C'est la maison elle même qui joue le rôle de capteur, d'accumulateur et de diffuseur de chaleur, ceci entraîne également une absence de frais d'entretiens.

1.3.2. Les solutions bioclimatiques sur les bâtiments anciens

Un précieux potentiel d'économies d'énergie et d'amélioration du confort est donc en friche dans ces bâtiments anciens. Concevoir les nouvelles constructions de manière optimale au niveau énergétique est une chose, mais les solutions de rénovation bioclimatique pour les maisons et les immeubles existants sont tout aussi importantes.

Les solutions bioclimatiques présentent l'avantage de pouvoir consommer très peu d'énergie, elles sous-tendent en effet d'éviter l'utilisation de systèmes actifs, elles sont retenues dans le cadre de cette étude. En revanche, leur installation ne découlent pas d'une improvisation et nécessite d'intégrer des paramètres tels que le climat, l'environnement extérieur et également des facteurs comportementaux. Autant les principes sont facilement applicables dans le cadre d'une construction, autant cet exercice est moins aisé pour une rénovation.

Ceci étant, elles peuvent permettre d'atteindre une réduction des besoins d'un facteur 4 comme montré sur la figure suivante. Dans le cas considéré, la plus grande réduction des besoins de chauffage est obtenue pour une maison existante rénovée par l'installation de matériaux d'isolation transparents, de fenêtres performantes (double vitrage basse

émissivité), d'un puits canadien (VN sur la figure), de matériaux à changement de phase (MCP), de stores opaques et l'isolation de la toiture.

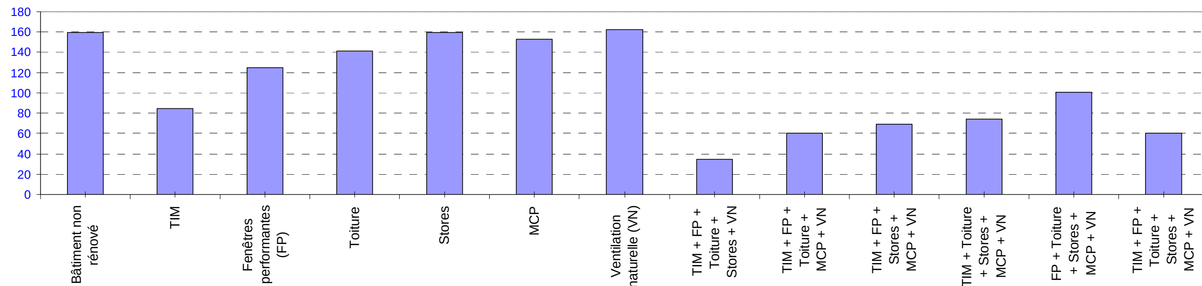


Figure 4. Comparaison des besoins de chauffage induits par différentes solutions bioclimatiques sur une maison individuelle existante à Marseille (TIM désignant les matériaux d'isolation transparents) (de l'auteur)

1.3.3. Choix des solutions bioclimatiques sur les bâtiments anciens

La question récurrente a été de savoir comment choisir les solutions bioclimatiques parmi la multitude de dispositifs disponibles ? Un premier tri est d'abord effectué en fonction du niveau de rénovation. Ceci étant, il peut demeurer de nombreuses solutions à tester.

Une méthodologie a donc été développée : elle permet de déterminer les éléments influents de l'enveloppe du bâtiment. Face à ces éléments, l'homme d'études peut alors proposer des solutions bioclimatiques associées.

De quelles possibilités dispose l'homme d'études confronté à un bâtiment à rénover sur lequel il souhaite intégrer des solutions bioclimatiques ? L'état de l'art nous a permis d'identifier les solutions ainsi que les méthodologies disponibles et de mieux cerner leur cadre d'application. Il est présenté dans la partie suivante.

2. ETAT DE L'ART

L'analyse bibliographique recense les différentes méthodes et méthodologies glanées dans la littérature (cf. 2.1) d'une part et les principes bioclimatiques (cf. 2.2) associés aux niveaux de rénovation identifiés (cf. 2.3) d'autre part.

Pour les méthodologies, il existe deux grandes familles : les guides et les outils. La méthodologie adoptée consiste à privilégier l'approche « outil » et par conséquent amène à décrire le bâtiment existant dans un outil de simulation énergétique. D'autre part, face aux innombrables possibilités de rénovation, nous avons cherché à limiter le nombre de simulations possibles. En outre, dans cette recherche de réduction du nombre de simulations, il existe plusieurs possibilités : soit limiter en amont par une connaissance « métier » (approche experte par exemple), soit consulter des experts, soit se baser sur des cas similaires, soit tester plusieurs solutions en faisant appel aux techniques de la recherche opérationnelle dite classique, soit ne rien faire ou soit utiliser la méthode des plans d'expériences.

Ainsi en appliquant la méthode des plans d'expériences, si l'on souhaite comparer 8 facteurs, une des familles des plans d'expériences (plans de Hadamard) amène à considérer 12 expériences, tandis que l'on passe à 256 (2^N) par l'approche classique !

L'objet de cette partie est de justifier le choix de l'approche retenue : la méthodologie experte par les plans d'expériences.

2.1. Etat de l'art des méthodologies existantes

En cherchant à préconiser des solutions pour un bâtiment existant, l'homme d'étude est souvent amené à réaliser un très grand nombre de simulations. Une autre réponse consiste à ne considérer qu'un système et à le tester avec le risque qu'il ne soit pas adapté au bâtiment étudié. L'alternative au nombre élevé de simulations est le découragement et l'abandon de la comparaison de systèmes. Comment proposer une autre issue ? La démarche logique semble de lister les différentes étapes auxquelles l'homme de l'art est confronté…

Au préalable, l'homme d'études se doit de caractériser le bâtiment à rénover. Sur ce bâtiment, quelles sont les solutions à simuler ? Comment réduire le nombre de simulations à réaliser ?

La bibliographie propose des pistes de réflexions pour répondre à cette problématique. Nous allons les présenter sous forme de questions / réponses et les mettre en lien avec la méthodologie proposée.

Quels sont les bâtiments étudiés ?

Le plan d'approche initial consistait à dresser une typologie des bâtiments sur lesquels l'étude de solutions bioclimatiques serait étudiée. Par bâtiments, il fallait entendre

construction et rénovation. En terme de construction, l'état de l'art a permis de se rendre compte de la richesse de la littérature dans ce domaine[9] mais également de l'existence de projets démonstratifs dans ce secteur (quartiers durables de Narbonne, Chalon sur Saône et Lille en France, Bedzed à Londres (cf. Figure 5) ou encore le quartier Vauban à Fribourg en Allemagne (Techno-sciences, 2007)), les principes bioclimatiques étant aisés à appliquer en amont.



Figure 5. BedZed, une éco-ville en banlieue de Londres (Pellegrino, 2007)

En terme de rénovation, nonobstant le fait de la médiatisation de cette priorité d'intervention, force est de constater que cet aspect est plus rarement traité dans la bibliographie, et pour cause : pour employer une métaphore cela reviendrait à proposer une même médication pour tous les malades !

Dans quel cadre situer les bâtiments existants ?

L'application de concepts généraux comme celui de «réhabilitation» ou de «rénovation» au domaine énergétique doit se faire de façon très prudente. Le terme de «réhabilitation» est utilisé par la profession du Bâtiment comme synonyme de « travaux sur un bâtiment existant », y compris ce qui pourrait être de « l'entretien », par opposition à la construction de bâtiments neufs. Par contre, l'usage plus courant est de réserver ce terme de « réhabilitation » à la réalisation d'un ensemble de travaux lourds, comprenant des actions sur le gros œuvre. Ce flou sémantique est causé par le fait que l'on se représente mal la réalité des travaux effectués (Orselli, 2005). Bien que ces termes n'aient pas de définitions précises, et que l'un ou l'autre des deux premiers soit utilisé dans le sens le plus général, leur définition est distinguée et l'étude se situe au niveau de la rénovation. Elle s'applique à la remise en état d'un logement individuel ou situé dans un immeuble collectif, sans intervention majeure sur le gros œuvre.

---

[9] Nombre d'analyses architecturales mais également thermiques de systèmes bioclimatiques sont disponibles : (Mazria, 1981), (Givoni, 1978), (Athienitis *et al*, 2002) entre autres.

Cependant, quels sont les édifices à rénover ? De nombreuses statistiques révèlent que ce sont les bâtiments construits avant la première réglementation thermique qui constituent la priorité ((Ceren, 2004), (Observatoire de l'Energie, 2007), (Clip, 2001)). Notons que la prospective de (Clip, 2001) qui dans un volet "Habitat et développement durable : bilan rétrospectif et prospectif" s'est penchée sur le problème, majeur pour la consommation énergétique de la France et ses émissions de gaz à effet de serre, des consommations de chauffage du parc de logement. Outre les résultats qui montrent à l'évidence que les priorités d'action de maîtrise de l'énergie et de contrôle des émissions de gaz à effet de serre au niveau de l'habitat existant où les potentiels d'économies d'énergie resteront pour encore longtemps bien supérieurs à ceux de l'habitat à construire, cette étude note aussi l'influence des structures urbaines sur les dépenses d'énergie associées aux logements dont l'importance justifie d'accorder une forte priorité aux stratégies de réhabilitation des centres villes.

Il conviendrait donc de réaliser la typologie des bâtiments construits avant 1974 en France et de l'analyser. Cela dit, cette période correspond à une régionalisation de l'architecture due notamment au contexte géographique et à l'exploitation des ressources locales. Il a paru plus intéressant de se focaliser sur la réalisation d'une méthode pouvant dresser les priorités d'interventions sur les bâtiments choisis mais également de préciser la méthodologie qui a permis d'arriver à la caractérisation de ces derniers.

Toutefois, il est à noter les travaux en cours sur la réalisation de cette typologie par Energies Demain qui devrait fournir courant 2008 une étude regroupant les quelques deux mille typologies recensées en France.

Quelles sont les méthodes proposées dans la littérature ? Des études ont été exécutées dans l'objectif d'améliorer les performances énergétiques des bâtiments existants, avec une approche dite « Isolation » [10] telles que (FFB *et al*, 2004) qui consiste à proposer un diagnostic dans le bâtiment, de même que (Hauglustaine *et al*, 2002) qui proposent un guide pratique pour les architectes sur la rénovation et l'énergie, en Belgique.

D'autres méthodes sont orientées sur une zone géographique particulière, c'est le cas de RehabiMed, Réhabilitation de l'Architecture Traditionnelle Méditerranéenne (RehabiMed, 2005), qui a pour objectif, dans la zone méditerranéenne, d'ordonner et de systématiser les étapes du processus de réhabilitation (de la volonté politique à l'exécution et à l'évaluation de l'intervention), d'identifier les outils et les instruments à considérer (techniques, administratifs et légaux) pour leur gestion et leur développement optimums, et de définir les critères qui doivent permettre de réfléchir sur les problèmes et les stratégies à mettre en place pour garantir le succès du processus. Pour la même région, (Arene, 1999) donne des préconisations en construction et en réhabilitation pour respecter les stratégies bioclimatiques. Cette étude a été réalisée dans le cadre de du contrat européen "Integration of renewable energies in the Mediterranean building".

On trouve aussi un rapport sur l'étude « basse énergie » sur les bâtiments anciens à Mulhouse (Enertech, 2007) qui propose la solution dite « isolation » sur des cas d'application. Elle a l'avantage d'aborder la stratégie de ventilation nocturne et ses répercussions sur le confort d'été.

Notons la solution de rénovation « universelle » proposée par (Enertech, 2007) et qui a l'avantage de proposer des solutions-types qui permettent d'être conforme à la réglementation thermique sans trop se poser de questions – et surtout pas vis à vis du CO_2 émis :

10 e.g. Par l'adjonction d'isolant ou encore la réfection des fenêtres

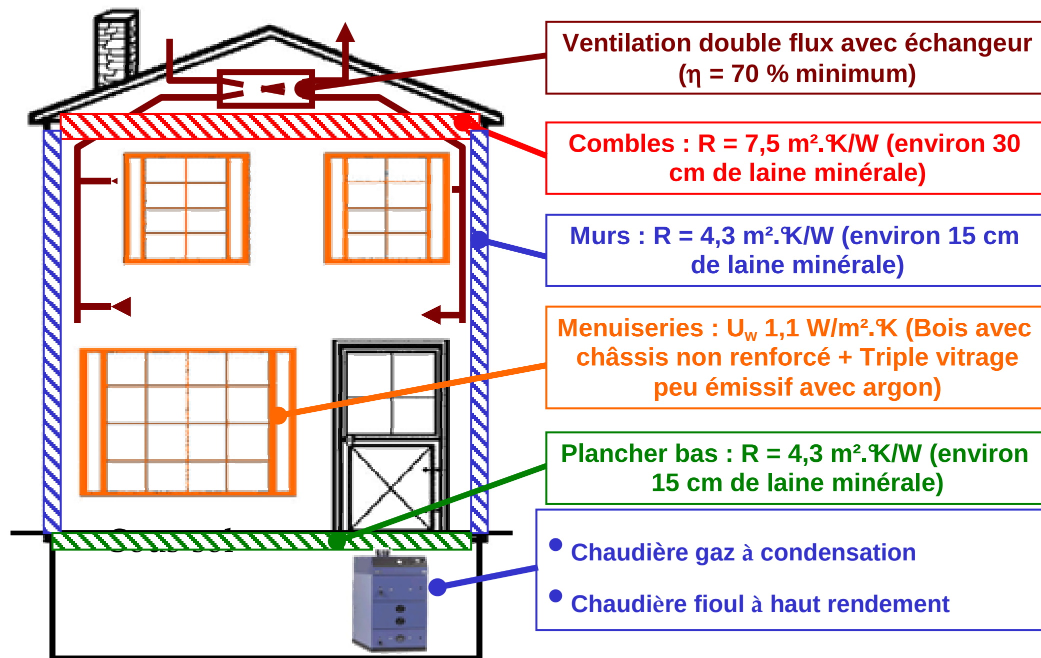


Figure 6. Scénario dit de la « Solution Universelle » (Enertech, 2007)

Cette méthode s'apparente à l'approche « Isolation ». Quelle approche utiliser quand l'on souhaite intégrer des solutions climatiques ?

D'autres explorations intègrent des paramètres dits passifs ou encore bioclimatiques notamment : (Collard *et al*, 1996) qui ont réalisé un guide d'aide à la rénovation bioclimatique, (IEA, 2000) qui analyse trois systèmes solaires dans le cadre d'une rénovation en comparant leurs performances dans différents pays : les collecteurs solaires, les balcons vitrés et l'isolation transparente. (Courgey *et al*, 2006) proposent un ouvrage qui expose les grands principes du contrôle énergétique à partir des éléments du bâti. L'avantage de cet ouvrage est de présenter un panel assez conséquent de solutions bioclimatiques (les murs capteurs accumulateurs, les serres bioclimatiques, les capteurs à air, les puits canadiens) et de dicter des spécificités liées à la rénovation.

Un programme spécifique a également été développé par la Commission Européenne en 1997. Il a donné lieu à un rapport « Bioclimatic Architecture » (European Commission, 1997) qui après avoir définit le terme « bioclimatique », l'approche passive ou encore les logements durables, passe en revue les stratégies bioclimatiques en faisant un focus sur l'impact du microclimat et sur la particularité de la morphologie urbaine. Cette étude aborde également le confort thermique par le polygone de confort. La notion de durabilité est intégrée par un point sur l'analyse du cycle de vie. Pour finir, elle présente des cas d'études dans le secteur tertiaire et hospitalier.

Ces ouvrages ont en commun de dresser un catalogue des interventions possibles sur l'habitat existant. Dans la deuxième catégorie, l'inventaire des actions réalisables est surtout à visée architecturale avec, dans certains cas, des bilans énergétiques correspondant à des bâtiments spécifiques.

Divers écrits se sont focalisés sur l'analyse typologique qualitative des édifices anciens ((Graulière, 2005) et (Joffroy, 1999)). Ces deux ouvrages n'apportent pas d'élément

quantitatif sur les consommations des bâtiments existants (ils n'associent pas à une typologie un ordre de grandeur de l'énergie consommée).

Toutes ces études ont été exploitées, d'une part pour recenser les systèmes disponibles, mais aussi pour intégrer des dispositifs émergents tels que le puits canadien ou encore les matériaux à changement de phase par une veille des études réalisées en milieu universitaire telles que (Hollmuller, 2000) ou encore (Ahmad, 2004) ; d'autre part, pour analyser la façon dont ces technologies peuvent être intégrées à un bâtiment existant.

Au niveau méthodologique, la littérature propose de nombreuses approches. Elles portent pour la plupart sur des solutions dites « Isolation » ((Roulet *et al*, 2002), (Gustafsson *et al*, 1986), (Jaggs *et al*, 2000)) et essentiellement sur les bâtiments tertiaires ((Filfi, 2006), (Santamouris, 2002)). Par ailleurs, elles se focalisent souvent sur des études de cas ((Peuportier, 2000), (Zhao *et al*, 2006)) et peuvent pousser à considérer un grand nombre de simulations.

(Flourentzou, 2004) évalue le potentiel d'assainissement d'immeubles locatifs par la méthode EPIQR qui permet, en Suisse, de définir et de chiffrer les interventions que le propriétaire s'engage à réaliser, d'évaluer le potentiel d'économies d'énergie et de calculer le délai maximal de réalisation des travaux.

L'approche « Isolation » consistant à limiter les pertes est différente de l'approche retenue dans cette étude qui intègre certes la limitation des pertes, mais également la maximisation des apports.

D'autre part, les méthodologies répondant à la problématique du secteur tertiaire ne satisfont pas aux exigences du secteur résidentiel, et à plusieurs titres : au niveau de l'intermittence (les bâtiments tertiaires sont pour la plupart occupés en journée tandis que pour les bâtiments résidentiels, le taux d'occupation est généralement plus important en soirée. Quand le bâtiment est occupé en journée les gains directs sont recherchés tandis qu'un déphasage dans la restitution de la chaleur peut être bénéfique pour les bâtiments occupés en soirée), de l'architecture (les typologies diffèrent notamment la surface d'occupation qui est plus grande dans le secteur tertiaire), des besoins énergétiques (le nombre d'occupants ainsi que l'énergie dégagée par les ordinateurs ou encore l'éclairage par exemple font que les apports internes peuvent être plus conséquents dans le secteur tertiaire) ou encore des besoins en confort.

En outre un outil a été développé par (Gratia *et al*, 2001) qui permet aux architectes de tenir compte de l'impact des choix de conception dans la construction d'un bâtiment résidentiel pour le climat Belge.

Notons que, dans le cadre de la tache 37, l'Agence Internationale de l'énergie (AIE, 2008) développe les principes de base d'une rénovation énergétique durable des logements, et ce tant au niveau de la conception que de la réalisation avec comme objectif d'élaborer, puis de réaliser, le guide à la rénovation énergétique durable des logements.

Par ailleurs, parallèlement à ce travail de thèse, EDF R&D a développé un outil d'aide multicritères à la décision REFLEX : Rénover Efficacement un Logement Existant (Pasanisi *et al*, 2008) et (Azard *et al*, 2007)). A partir de la description d'un bâtiment existant, ledit outil : propose les alternatives de rénovation énergétique envisageables au sens « isolation » et « systèmes », évalue les alternatives proposées selon plusieurs critères (économiques, énergétiques, environnementaux, confort, divers), hiérarchise les alternatives dont les

performances ont été jugées satisfaisantes, en utilisant des méthodes d'analyse multicritères. Schématiquement, l'outil REFLEX est composé des 4 modules suivants :

- Un module de génération des solutions de rénovation qui, à partir de la description du logement existant, des souhaits et des contraintes du décideur identifie les scénarios de rénovation envisageables.
- Un module d'évaluation qui évalue les performances des solutions de rénovation selon les différents critères qui rentrent en jeu dans le processus de décision.
- Un filtre multicritère interactif qui permet d'exclure les solutions dont les performances sur un ou plusieurs critères ne sont pas jugées satisfaisantes par les deux acteurs (client et EDF).
- Un module de sélection multicritère qui hiérarchise les solutions de rénovation du point de vue du client d'une part et d'EDF d'autre part.

Le module de génération permet de construire les solutions de rénovation à évaluer et analyser. Les simulations effectuées se basent toutes sur des modèles déjà réduits de bâtiments, où seules l'isolation et les surfaces sud équivalentes vitrées (pour les apports solaires) sont des paramètres du bâti sur lesquels il est possible d'intervenir. Ensuite, les systèmes disponibles sont appliqués sur le modèle réduit choisi de bâtiment instancié de ses paramètres d'isolation et d'apports solaires. Tout cela constitue un catalogue de solutions possibles, qui peut engendrer une explosion combinatoire. Un premier filtrage consiste à étudier le gain d'efficacité énergétique de la solution étudiée par rapport à son coût d'investissement.

De façon similaire, (Kaklauskas *et al*, 2004) s'est attaché à appliquer les méthodes d'analyse multicritères dans le cadre de la rénovation de bâtiments publics. L'avantage de cette méthode est d'intégrer de nombreux critères et de choisir parmi un très grand nombre de solutions les plus performantes.

Nous avons dans cette étude, afin d'intégrer les solutions bioclimatiques, opté pour les modèles détaillés[11] et préféré nous focaliser sur la réduction du nombre de simulations.

Le dessein est d'aller au delà des études conventionnelles consistant donc soit à proposer un catalogue, des solutions « classiques » ou encore à réaliser des études de cas, mais bien de développer une méthodologie incluant des solutions bioclimatiques à appliquer à n'importe quel bâtiment résidentiel existant !

Comment tester les solutions bioclimatiques sur un bâtiment existant en limitant le nombre de simulations ?

Des applications mathématiques sont également valorisées notamment celles de (Fürbringer, 2006)[12] et (Filfi, 2006)[13] : elles permettent ainsi de dépasser l'approche de sensibilité classique gourmande en temps de calcul mais aussi d'optimiser le dimensionnement de certaines technologies (Wetter, 2004) telles que la serre, les matériaux d'isolation transparents ou encore le mur capteur accumulateur. L'approche de (Fürbringer, 2006) est focalisée sur la ventilation. Celle de (Filfi, 2006), qui s'intéresse à la minimisation des consommations dues à la climatisation dans le secteur tertiaire, consiste à mettre au point une méthodologie permettant d'approcher sans simulation les

---

11 Offrant par ailleurs la possibilité d'intégrer des phénomènes spécifiques tels que la ventilation naturelle.

12 (Fürbringer, 2006) Méthodologie des plans d'expériences : Notes de cours, Fürbringer JM., EPFL, Institut de Technique du Bâtiment, Laboratoire d'énergie solaire et de physique du bâtiment, 2006

13 Cette thèse se focalise sur les bâtiments tertiaires pour lesquels une typologie existe. D'autre part, elle se limite aux consommations en refroidissement et à des considérations économiques.

consommations totales d'un bâtiment neuf et la comparaison d'une consommation annuelle estimée après une amélioration de la consommation existante dans le cas d'une rénovation.

Dans le cas d'études à plusieurs facteurs, on est souvent amené à réaliser un grand nombre d'essais. L'utilisation de plans d'expériences permet d'optimiser l'organisation des essais pour l'élaboration de modèles expérimentaux de grande précision. Pour un même nombre d'essais, leur structuration, selon la méthode des plans d'expériences, permet d'accroître la précision de la mesure des effets des facteurs pris en compte (Gidel, 2001). Ceci n'est qu'un des avantages de cette méthode. Elle permet aussi :

- d'étudier un grand nombre de facteurs,
- d'optimiser le nombre d'essais à réaliser (utile lorsque le nombre de facteurs est important),
- de détecter et de quantifier d'éventuelles interactions,
- et enfin de modéliser simplement les résultats (modèles polynomiaux).

En voyant le bâtiment comme une association d'éléments (toiture, fenêtre, mur, ventilation, plancher), les plans d'expériences permettent de dresser un organigramme décisionnel en terme d'intervention sur le bâtiment en fonction des réponses étudiées. Le recensement des différentes solutions bioclimatiques permet d'identifier à quels éléments du bâtiment et à quel niveau de rénovation elles correspondent. Ainsi les matériaux à changement de phase sont associés aux cloisons internes légères. Pour choisir les solutions appropriées, la détermination des éléments ayant un impact sur les réponses retenues est fondamentale. Les facteurs correspondent à des paramètres thermo physiques caractéristiques des éléments du bâtiment. Les critères retenus pour cette étude sont les besoins en chauffage en hiver et un indice de confort en été déterminé par l'approche adaptative.

Les solutions climatiques proposées découlent de stratégies bioclimatiques que nous sommes attelés à décrire et à étudier dans le cadre d'une rénovation.

2.2. Principes d'application des stratégies bioclimatiques dans le cadre d'une rénovation

Premier jalon de cette étude, les stratégies bioclimatiques constituent son fil conducteur. Au préalable il a fallu définir ce que sous-tendait la « conception bioclimatique ». Le premier réflexe, a été de rechercher la définition de bioclimatique dans un dictionnaire (Larousse, 2000) : « Relatif à l'étude de l'influence des facteurs du climat sur le développement des êtres vivants ». L'influence des facteurs du climat sera retenue, le reste de la définition ne se rapportent pas explicitement à la construction.

(Collard *et al*, 1996) apporte des éléments plus précis, en associant le mot « bioclimatique » à l'« architecture » et semble mieux situer la démarche : si l'architecture « solaire » se base essentiellement sur la prise en compte du soleil et son utilisation optimale (active ou passive), dans un site défini, en vue d'une réduction des besoins énergétiques, l'architecture « climatique » recouvre, dans une vision globale, l'ensemble des facteurs climatiques et

d'ambiance. Quant à parler d'architecture « bioclimatique », c'est quitter le seul plan des économies d'énergie et s'en référer prioritairement à la notion de confort pour l'homme, qu'il soit thermique, respiratoire ou visuel.

Voilà fixés, par cette dernière définition, les objectifs à atteindre dans cette étude.

Après avoir dégagé les grands principes de la conception bioclimatique dans les ouvrages traitant principalement d'architecture ((Architecture et Climat, 2005),(Camous *et al*, 1979), (Courgey *et al*,, 2006), (Chatelet *et al*, 1998), (European Commission, 2007), (Mazria, 1983), (Pacer, 2006), (Tareb, 2004) ou encore (Wright, 1979)), il a été nécessaire de les rattacher à la «physique» sous-tendue par ces derniers. En effet, pléthore d'ouvrages traitent de ces stratégies, mais rares sont ceux qui les justifient par une approche énergétique critique en revenant aux fondamentaux de la physique. Notons toutefois, (Cardonnel, 1983), (Mansouri, 2003), (Santamouris *et al*, 1996), (Athienitis *et al*, 2002) qui développent l'approche physique pour des stratégies spécifiques ou encore dans le cadre d'une construction. Le recensement des stratégies bioclimatiques aboutit à une synthèse réalisée pour les bâtiments neufs et construits (Flory-Celini, 2008), dont la singularité réside dans l'association des aspects architecturaux et thermiques. Les principes dont découlent des stratégies de chaud et de froid sont résumés comme suit :

- **Stratégies de chaud** (Figure 7 et Figure 8) :

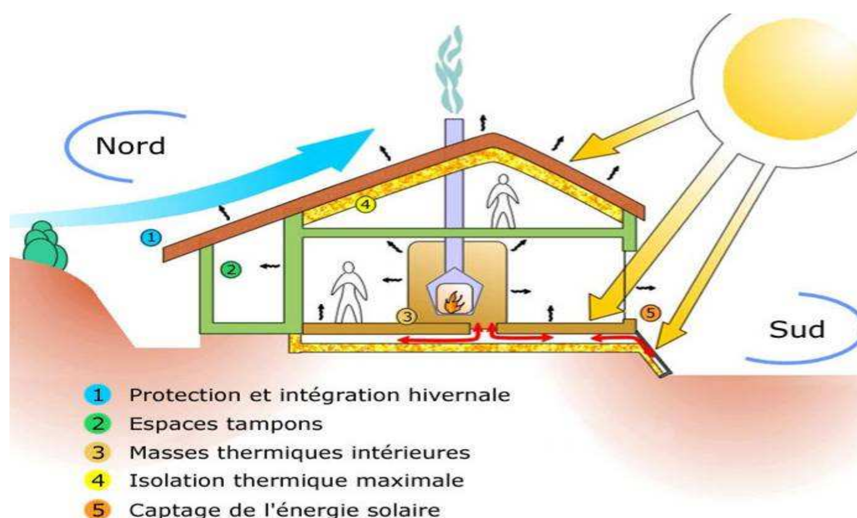


Figure 7. Illustration des stratégies de chaud pour des vents dominants Nord (Charmeau, 2005)

Après s'être correctement protégé du vent, le captage solaire sera favorisé en journée. Afin de garder un peu de chaleur pour les nuits froides, une forte inertie est prescrite pour les bâtiments à faible inertie[14]. Cette inertie doit être suffisante pour lisser les températures intérieures en période d'occupation. Il n'empêche que cette chaleur captée et stockée doit être conservée. En ce sens une isolation performante et une inertie adaptée seront installées.

Parmi les structures se définissant comme étant solaires passives, certaines seront plus efficaces, puisqu'elles auront optimisé les opérations suivantes en hiver : se protéger du

[14] Selon la période de construction, les bâtiments existants disposent d'une inertie suffisante, c'est par exemple le cas des logements anciens en pierres ou en pisé. En revanche, les Trente Glorieuse se caractérisent par un mode constructif ayant favorisé l'émergence de bâtiments à classe d'inertie légère.

vent, définir la forme du bâtiment, capter la chaleur du rayonnement solaire, la stocker dans la masse, la conserver par l'isolation et la distribuer dans le bâtiment.

À défaut de satisfaire l'une ou l'autre de ces variables, l'efficacité de la stratégie solaire passive peut être sérieusement compromise.

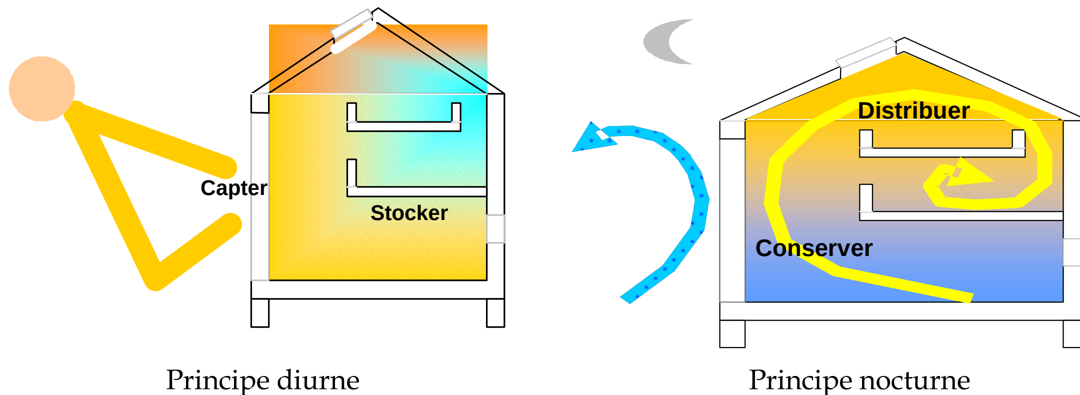


Figure 8. Principes diurne et nocturne des périodes froides (de l'auteur)

- **Stratégies de froid :**

Le développement du conditionnement d'air au début du siècle précédent a conduit au déclin des solutions passives de refroidissement. Pendant un temps elles ont même été complètement ignorées, jusqu'à la crise énergétique des années 1970 qui a créé un intérêt nouveau pour ces techniques (Tareb, 2004).

Sous les latitudes de la France Métropolitaine, les concepteurs et les thermiciens se sont jusqu'à présent focalisés sur la problématique du confort d'hiver. Depuis quelques années, et notamment à partir de la canicule de l'été 2003, le confort d'été devient une forte préoccupation. En outre, ces derniers temps, un accroissement de la vente de climatiseurs a été remarqué (Pellegrino, 2007). L'objectif est ici d'apporter des réponses à la production de froid sans utilisation de systèmes actifs. Le vent est cette fois-ci, avec le tirage thermique, utilisé pour la ventilation naturelle pouvant permettre, par des sur ventilations nocturnes, une diminution de la température intérieure. Tout système permettant d'exploiter la chaleur latente, et en particulier celle de l'eau peut également être utilisée pour rafraîchir les locaux (évapotranspiration, toitures végétalisées ...).

Le lien entre les stratégies de refroidissement passif et les phénomènes thermiques correspondants, est rappelé dans le Tableau 5.

La température d'un bâtiment dépend de facteurs liés à l'architecture et aux conditions d'occupation du bâti. Les paramètres agissant sur l'augmentation de la température d'un bâtiment en été sont déterminés afin de pouvoir se prémunir de ces chaleurs indésirables en terme de confort thermique :

- la température moyenne extérieure qui dépend du site (données climatologiques)
- les apports internes et solaires
- la variation diurne de la température
- l'inertie du bâtiment.

Tableau 5. Principes de conception bioclimatique pour les périodes chaudes (Figures de (European Commission, 1997)) (de l'auteur)

Principes diurnes : S'opposer aux gains de chaleur	**Principes nocturnes :** Favoriser les pertes de chaleur
Se protéger du soleil Conduction : - Limiter les transferts de chaleur par conduction - Déphaser les variations périodiques de température Rayonnement : Limiter les gains solaires	Ventilation naturelle Convection : Favoriser la ventilation
Evaporation : Favoriser le refroidissement par évaporation Evapotranspiration : Favoriser le refroidissement par la végétation	Récupération de la chaleur latente
Limiter les gains externes	Favoriser le refroidissement par rayonnement nocturne
Limiter les gains internes	

Pour illustrer ce propos, la Figure 9 montre comment se décompose le comportement thermique d'un local et la façon dont ces paramètres sont générés : tout comme dans le cas des stratégies de chaud par l'utilisation de chauffage solaire passif, six conditions sont essentielles à toute stratégie de refroidissement passif qui traduisent l'action sur les paramètres cités ci-dessus : l'action sur la morphologie du bâtiment (forme architecturale), la protection contre le rayonnement solaire (isolation thermique et protections solaires) , la minimisation des gains internes, la dissipation des surchauffes et le refroidissement des locaux en tirant partie de l'environnement.

Il ressort de cette approche qui consiste à distinguer les stratégies d'été et d'hiver qu'il vaut mieux les regrouper car certains principes tels que l'éclairage naturel ou encore la végétation s'appliquent à ces deux périodes ; cette première approche excluant, par ailleurs,

les mi-saisons. Ainsi, une stratégie profitable, qu'il fasse chaud ou froid, est l'éclairage naturel dont la finalité est d'améliorer le confort visuel et diminuer les charges dues à l'éclairage artificiel, un des points délicats dans cette dernière approche étant la caractérisation du confort visuel. Cette stratégie est présentée dans (Flory-Celini, 2008) et constitue une perspective d'évolution de l'outil proposé dans cette étude.

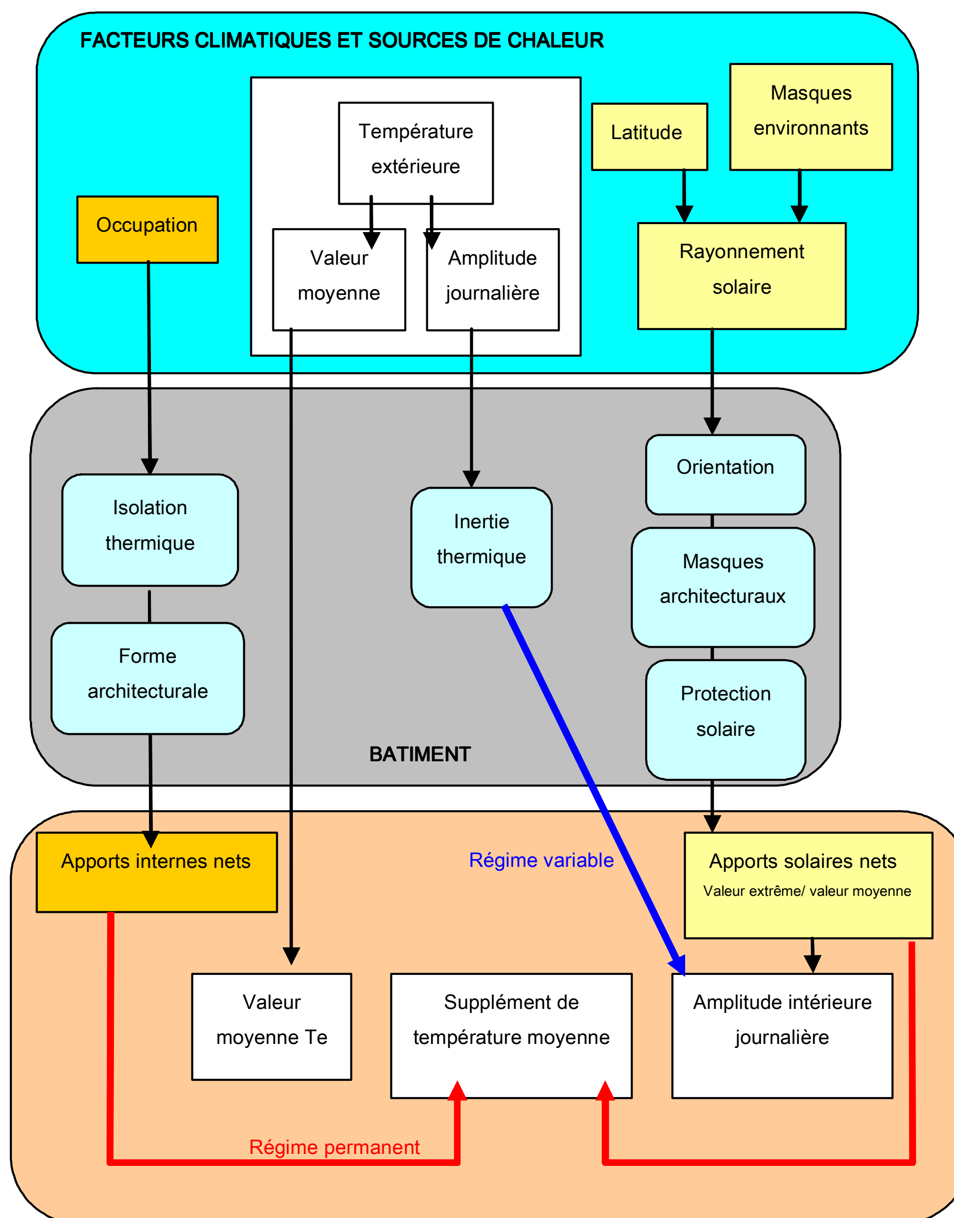


Figure 9. Paramètres agissant sur la température d'un local adaptés de (Izard, 1993)

La conception bioclimatique se décline donc sous forme de stratégies, qui vont de la protection contre le vent à la façon dont on peut tirer partie de la ventilation naturelle en passant entre autre par le captage solaire. La description des stratégies bioclimatiques ((Flory-Celini, 2008) et Annexes) présente une partie sur le vent et la ventilation naturelle, choix non fortuit car dénotant en effet la complexité de ces stratégies : le vent par exemple, peut être bénéfique en été (ventilation naturelle) et préjudiciable en hiver !

Le défi à relever dans cette étude est donc de trouver un compromis entre ces principes qui peuvent sembler antinomiques dans l'objectif de réduire les besoins énergétiques,

d'améliorer le confort et la qualité de l'air intérieur tout en veillant à rester dans un intervalle économiquement acceptable. Ainsi, face à ces stratégies, pour lesquelles le challenge à relever consiste à trouver un consensus entre des principes qui peuvent sembler contradictoires (capter et se protéger du soleil !), des dispositifs permettant de les respecter sont examinés en annexe. La difficulté a résidé dans l'évaluation des techniques qui sont applicables en terme de réhabilitation énergétique des bâtiments. Néanmoins, parmi toutes les techniques applicables dans le neuf, une liste présentant les possibilités d'intégration des dispositifs aux édifices existants est présentée (cf. § 2.3 et 4.7). Le but est d'exploiter au maximum les variations d'évolution de la température extérieure, en jouant sur le déphasage entre celle-ci et la température intérieure, cette dernière devant être lissée le plus possible en période d'occupation. Cela est possible par une inertie adaptée, une isolation pertinente et une gestion optimale de la ventilation et des apports solaires.

Par ailleurs, avant toute construction ou rénovation, une analyse fine du site sera nécessaire : ensoleillement, étude des vents, masques proches et lointains, présence de surfaces aquatiques, etc.

Toutes ces stratégies sont déclinées, bien sûr, en ayant pour leitmotiv l'équilibre entre le bâtiment, l'environnement et l'occupant, base de la conception bioclimatique !

L'application de ces principes passe par l'installation de dispositifs spécifiques largement présentés en annexes. Les dispositifs sélectionnés pour les applications découlent essentiellement du niveau de rénovation et des modèles existants.

Cette analyse diffère des ouvrages existants tels que (Collard *et al*, 1996), (European Commission, 1997), (Courgey *et al*, 2006), ou encore (Hauglustaine *et al*, 2002) qui n'associent pas les solutions de rénovation au degré de travaux que compte réaliser le décideur.

En terme de bâtiments existants, les principes bioclimatiques sont placés dans le cadre d'une rénovation. L'application directe est l'association des dispositifs climatiques à des niveaux de rénovation (cf. § 2.3). Au préalable, les différents niveaux de rénovation sont présentés et définis.

2.3. Les solutions climatiques associées aux niveaux de rénovation

La rénovation d'un bâtiment est un processus complexe qui nécessite une certaine coordination entre les différents intervenants, faute de quoi il peut engendrer de nouveaux problèmes d'ordre structurel ou thermo aéraulique pour le bâtiment. Une planification à long terme revêt donc la plus haute importance pour sa réussite.

Il est nécessaire de bien réfléchir avant une rénovation et d'étudier les possibilités d'application d'une démarche bioclimatique. Pour ce faire, un bilan énergétique est réalisé et les interactions des divers éléments du bâtiment sont analysées afin d'élaborer des solutions de rénovation globale dès le début de l'analyse de la situation.

Dans (Birraux *et al*, 2001), on note que les apports solaires passifs pourraient contribuer à près de 6% des besoins en chauffage dans le parc ancien. A cet effet, on peut se demander comment intégrer ces techniques passives dans les bâtiments anciens, et comment peut on extrapoler de façon à ne pas se limiter aux dispositifs solaires, mais en considérant toutes les techniques climatiques disponibles ? Pour ce faire, il est essentiel d'intégrer ces techniques dans le bâtiment à rénover en tenant compte du degré de réhabilitation escompté. Il est donc nécessaire d'étudier la façon dont se présente le cycle de rénovation d'un bâtiment.

Les différents niveaux de rénovation ont été présentés au § 1.2.3. Selon le type de dispositif climatique, nous allons maintenant préciser à quel niveau de rénovation il peut se situer :

- Niveau 1 : rénovation légère → « rénovation diffuse »
- Niveau 2 : rénovation moyenne → rénovation
- Niveau 3 : rénovation complète → réhabilitation
- Niveau 4 : Système non applicable à la réhabilitation.

Notons : Niveau1 $\subset$ Niveau 2 $\subset$ Niveau 3.[15]

Nous en sommes arrivés à un récapitulatif de solutions que nous listons dans le Tableau 6, mais seules certaines sont exploitées dans le cadre de cette étude. Néanmoins, dans un souci de perspectives d'amélioration de l'outil proposé, le choix a été fait de les présenter. Un des desseins fixés par EDF R&D, étant la réalisation d'un guide de prescription pour intégrer les solutions bioclimatiques dans l'habitat existant. En annexe, les solutions retenues sont décrites et modélisées : la fenêtre, la serre, le puits canadien, la ventilation naturelle, le mur capteur accumulateur, les matériaux à changement phase et les matériaux à isolation transparents. Ces systèmes sont étudiés dans la partie 7 qui consacre l'application de la méthodologie à des bâtiments de référence.

[15] Avec $\subset$: inclusion.

Tableau 6. Les dispositifs climatiques et leur niveau de rénovation (de l'auteur)

Solutions bioclimatiques	Rénovation	Niveaux
La fenêtre	Les fenêtres sont responsables d'une part importante des pertes thermiques de l'enveloppe du bâtiment. La résistance thermique des fenêtres moyennes est inférieure à celle d'un mur bien isolé. Mais aujourd'hui la partie faible n'est plus le vitrage, mais plutôt le cadre des fenêtres. Il doit donc être aussi petit que possible par rapport à la partie vitrée. On veillera à une certaine cohérence entre l'épaisseur d'isolation de la façade et la qualité thermique des fenêtres. Cela n'a en effet pas de sens de doter un mur extérieur d'une isolation extrêmement épaisse si l'on conserve une fenêtre à simple vitrage. L'isolation de la façade et l'assainissement des fenêtres doivent être planifiés conjointement, ceci pour les raisons suivantes : _ Les embrasures ne peuvent être isolées que si la largeur du cadre laisse suffisamment de place pour le faire. _ Avec des fenêtres plus étanches, sans ventilation appropriée, l'humidité de l'air intérieur augmente, ce qui accroît le risque de condensation au niveau des ponts thermiques	**1**
La masse thermique	Pour le chauffage, la masse thermique devrait être ajoutée où le rayonnement solaire d'hiver est déjà disponible. La masse thermique peut également être située près d'un radiateur. Pour se refroidir, la masse thermique doit être protégée contre le soleil d'été et être exposée aux brises de refroidissement de nuit. La masse thermique doit être employée en même temps que la bonne conception passive afin de travailler efficacement. Elle doit être associée à des dispositifs d'ombrage pour la protéger contre le soleil d'été. Sa capacité d'absorber et re-rayonner la chaleur avec un grand déphasage signifie que pendant l'été ou sous les climats chauds, elle peut être une source de chaleur fâcheuse longtemps après que le soleil se soit couché. Ne pas couvrir de moquette ou tapis isolant les surfaces en béton qui sont exposées au soleil d'hiver. La surface de plancher peut être couverte de céramiques ou autres revêtements de bonne conductivité thermique. Une peau interne de brique (ou un matériel de masse élevée) peut être ajoutée aux structures bois de construction encadrée pour augmenter la masse thermique. Cette technique de construction est connue en tant que placage renversé de brique. Il faut néanmoins veiller, pour qu'elle soit efficace, à situer la brique à l'intérieur du bâtiment. L'intégration de matériau à changement de phase est également envisageable. Elle présente également l'avantage de ne pas trop réduire la surface habitable. Ces matériaux et leur application sont décrits en annexe.	**2**

Solutions bioclimatiques	Rénovation	Niveaux
L'isolation	Elle doit être épaisse avec des raccords étanches. les ponts thermiques sont à éviter. L'idéal est une enveloppe isolante extérieure i.e. une isolation sur la façade, sous le plafond de la cave ou au niveau du sol des combles ou sur les chevrons. Augmenter les niveaux existants d'isolation et isoler tous les plafonds et murs (et planchers précédemment non isolés dans des climats frais).	**1, 2 ou 3**
La serre	Ce dispositif présente de nombreuses de configurations variétés géométriques : son intégration dépendra donc de la configuration du bâtiment. Les serres peuvent soit simplement être ajoutées à la façade sud, partiellement ou totalement intégrées au bâtiment, couvrant partiellement ou complètement toute la largeur du bâtiment, sur un étage, un étage et demi, deux étages ou plus. Parfois même des serres isolées fournissent de l'air chaud à des appartements avec l'aide de conduits et de ventilateurs. Si la serre couvre plus de deux étages, le risque de surchauffe est aggravé dans les étages supérieurs (Faist, 1998).	**2**
L'atrium	Il est nécessaire que le bâtiment dispose d'une cour intérieure. Néanmoins, s'il s'agit de la rénovation d'un quartier, il est possible d'associer deux bâtiments pas trop éloignés, et de surfaces similaires par ce dispositif. Un atrium peut créer une contribution très significative aux économies d'énergie dans le bâtiment qui le contient en procurant une source importante d'éclairage naturel, parfois profondément à l'intérieur du bâtiment, qui remplace avantageusement l'éclairage artificiel. En revanche, il devra être associé à une bonne ventilation pour éviter les surchauffes d'été	**3**
Les réflecteurs	Facilement intégrables, encore faut-il que le bâtiment ne fasse pas partie d'une zone classée par les Architectes de France	**1**
Le mur trombe et ses variantes	Nécessite de l'espace. Difficilement accepté au niveau esthétique. Avec l'apparition des matériaux à isolation transparents, les performances énergétiques et l'aspect esthétique sont améliorés.	**2 ou 3**
La toiture végétalisée	Convient très bien aux immeubles notamment en zones urbaines. Dans les régions urbaines, les terrasses-jardins (ou toitures-jardins) permettent de réduire la consommation d'énergie nécessaire pour chauffer ou climatiser les bâtiments – réduisant du même coup les émissions de gaz à effet de serre – grâce à l'ombrage et à l'évapotranspiration fournies par les plantes et à une valeur isolante accrue. À ces avantages s'ajoutent aussi l'accroissement de la durée de vie des membranes de toit, l'ajout d'espaces verts et l'augmentation de la valeur immobilière. Ces jardins peuvent également jouer un rôle important dans la gestion des eaux pluviales en retardant et en réduisant l'écoulement de l'eau de pluie vers les collecteurs, limitant ainsi le risque de débordement des égouts (réseaux d'eau pluviale). La résistance mécanique de la structure doit toutefois être vérifiée.	**2**
Les toitures bassin	Nécessite une bonne étanchéité de toiture et d'y associer une bonne protection nocturne en hiver	**3**

Solutions bioclimatiques	Rénovation	Niveaux
La façade double peau	Nécessité d'avoir de l'espace disponible en façade. Ne convient pas toujours aux bâtiments résidentiels car elle peut entraîner des surchauffes en été à moins d'être associée à une gestion des volets et de la ventilation correcte.	**3**
Capteurs à air en façade	Même mise en œuvre que l'isolation extérieure. La façade ventilée est composée de trois couches : le mur porteur existant, l'isolation thermique et le revêtement qui sert de couche de protection. Un espace ventilé est laissé entre la couche d'isolation et le revêtement, d'où le nom de façade ventilée.	**3**
La ventilation naturelle	Solution facilement applicable. En revanche, il est nécessaire que les pièces du bâtiment soient correctement disposées afin de distribuer correctement la chaleur. Il est souvent associé aux fenêtres. Solution qui correspond à une problématique d'été.	**1, 2 ou 3**
Le puits canadien	Dans les bâtiments possédant une cave, si tant est qu'ils ne soient pas dans une zone où on note la présence de radon, il est possible de tirer partie de la température de cette cave en hiver et en été. Pour les autres cas, il faut qu'une tranchée puisse être creusée en profondeur, à l'extérieur du bâtiment	**2 ou 3**
Les protections solaires	Facilement intégrable. Solution qui correspond à une problématique d'été	**1**
La végétation	Elle peut être installée par l'intermédiaire d'un toit végétalisé s'il n'y a pas d'espace disponible autour du bâtiment. La végétation autour d'un bâtiment est un élément important : cela signifie que l'on choisira plutôt un site riche en verdure ou que l'on créera de la végétation dans un site où elle est absente. Le rôle du microclimat, et de ses possibilités de brise locale ou d'écoulement d'air induit, est fondamental pour déterminer les conditions de bien être dans un environnement bâti. Mise à part l'ombre créée, la végétation transpire de l'eau qui peut provoquer un effet de rafraîchissement passif par évaporation.	**1, 2 ou 3**
L'eau	Nécessité d'un espace disponible. L'eau peut être exploitée par plusieurs biais : des colonnes d'eau pour améliorer le stockage de la chaleur à l'intérieur d'un bâtiment ou encore l'installation de plans d'eau à l'extérieur qui favorise l'évapotranspiration.	**2 ou 3**
L'éclairage naturel	Pour les combles, l'installation de fenêtre en toiture est généralement possible. Une solution pour les bâtiments dont les pièces ne peuvent être décloisonnées est l'installation d'un puits de lumière	**1, 2 ou 3**

2.4. Conclusions sur l'état de l'art

La présentation du contexte a mis en exergue que la rénovation constitue la priorité d'intervention dans le secteur du bâtiment résidentiel.

La méthodologie proposée est la conséquence de nombreux questionnements qui partent du constat suivant : Quelle démarche adopter quand on souhaite rénover un bâtiment ? Pour ce faire, nous nous sommes intéressés à la matière fournie dans la littérature. L'homme d'études souhaitant appliquer des solutions bioclimatiques dans ce secteur dispose de guides ou de catalogues d'interventions et doit, en général, réaliser un grand nombre de simulations pour les comparer. Il dispose également d'outils souvent dédiés à une application spécifique (e.g. : ventilation naturelle ou d'éclairage naturel).

L'analyse de la bibliographie nous a poussé à développer la méthodologie experte par les plans d'expériences que nous avons décidé de nommer MEXPER.

Nous proposons de fournir à l'homme d'études une méthodologie lui permettant d'identifier les éléments influents sur le comportement thermique d'un bâtiment étudié en limitant le nombre de simulations et une feuille de route lui permettant d'y associer des solutions bioclimatiques adéquates.

L'état de l'art permet de fixer le contour de l'étude : les systèmes passifs sont retenus sur des bâtiments de référence anciens (construits avant 1975) dont on ne change pas la structure (on considère une rénovation) ni le positionnement des fonctions (l'emplacement des zones reste identique). Les objectifs du label Basse Energie sont retenus. A cet effet, les différentes stratégies bioclimatiques ont été présentées et des solutions associées proposées. Ces solutions ont été déclinées en fonction du niveau de rénovation.

L'objectif est de développer une méthodologie qui permet d'identifier les solutions bioclimatiques à installer en un nombre de simulations réduit.

La réduction de ces simulations est obtenue par la méthode des plans d'expériences dont les principes sont présentés ci-après.

3. PLANS D'EXPERIENCES

Afin d'optimiser le choix des solutions bioclimatiques dans l'habitat existant, il semble ad hoc d'analyser les priorités d'actions en terme d'installation de dispositifs bioclimatiques. En ce sens, étudier l'impact de chaque élément du bâtiment sur le comportement thermique de ce dernier paraît pertinent. Les solutions associées aux éléments prioritaires seront ensuite identifiées par l'homme d'études.

Afin de dresser un organigramme décisionnel en terme d'interventions sur le bâti, une méthode mathématique permettant de réduire le nombre de simulations à ce qui est strictement nécessaire pour prendre une décision, engendrant ainsi un gain de temps considérable, a été choisie. C'est la méthodologie des plans d'expériences. Pour nos applications, ces expériences déterminent l'influence de la variation de l'état de tel ou tel facteur du bâtiment sur les performances choisies de ce dernier.

3.1. De l'utilité des plans d'expériences…

L'origine des plans d'expériences remonte au début du siècle dernier à des fins agronomiques. Ils reposent essentiellement sur des expérimentations multi facteurs et sur un traitement des résultats à l'aide de régressions multiples et d'analyse de la variance. Ils sont restés du domaine de quelques spécialistes et leurs applications industrielles ont été réduites du fait de la complexité des calculs qu'ils nécessitent, jusqu'à l'arrivée des moyens informatiques puissants ((Souvay, 1995) cité par (Filfi, 2006)).

Citons (Fürbringer, 2006)[16] : « L'argument clé pour faire l'apologie des plans optima est qu'il y a toujours un plan d'expérience. Il vaut donc mieux le construire de manière logique avant l'expérience que de devoir ensuite utiliser des outils statistiques extrêmement complexes pour tirer de l'information pertinente des résultats d'un mauvais plan. La méthodologie des plans d'expériences correspond à une prépondérance accordée à la réflexion au détriment de l'expérimentation. »

L'objectif de la méthode appliquée à la simulation thermique dynamique du bâtiment est d'obtenir un maximum d'informations avec un minimum de simulations. En effet, pour un problème défini, différentes solutions peuvent être testées, évaluées et comparées. Une organisation systémique des simulations accélère l'obtention des résultats en diminuant en même temps le risque d'erreurs (Filfi, 2006).

---

[16] (Fürbringer, 2006) Méthodologie des plans d'expériences : Notes de cours, Fürbringer JM., EPFL, Institut de Technique du Bâtiment, Laboratoire d'énergie solaire et de physique du bâtiment, 2006

Notons qu'un plan d'expériences est réalisé pour un bâtiment de référence donné, dans une configuration fixée. Il est clair que pour des bâtiments similaires (morphologie, situation), les résultats trouvés pourront être exploités. Néanmoins, le principal objet de la démarche est de proposer une approche méthodologique applicable à nouveau quelque soit l'édifice : c'est une méthode systématique. La méthode retenue est conditionnée suivant les propositions suivantes :

- choix de bâtiment de complexité croissante
- réalisation de plans d'expériences pour chaque bâtiment de référence, afin de déterminer les facteurs dominants
- élaboration d'un organigramme décisionnel pour les interventions sur chaque bâtiment de référence.

L'objectif est d'étudier l'influence des facteurs (éléments du bâtiment : fenêtre, murs opaques, toiture, ventilation, inertie) sur les réponses suivantes : les besoins énergétiques en hiver et un indice intégrant le confort adaptatif en été. Ce choix a été motivé par une approche initiale énergétique. Notons que ces solutions sont retenues dans nos cas d'études, d'autres réponses étant tout à fait intégrables (besoins en refroidissement, concentration de CO_2, etc.). En outre dans les applications présentées (cf. § 5), des paramètres spécifiques aux éléments sont considérés. Ces paramètres thermo physiques, déterminés par l'homme d'études, découlent de l'analyse des solutions climatiques. Ainsi, pour un logement, l'homme d'études peut par exemple considérer le type de fenêtre, le facteur solaire des fenêtres (présence ou non de volets), le coefficient de déperditions des murs et du plancher, l'inertie (adjonction de matériaux à changement de phase au niveau des parois légères) et la ventilation nocturne.

Deux types de plans d'expériences sont détaillés dans ce chapitre. Tout d'abord les plans factoriels et ensuite les plans fractionnaires qui permettent de réduire fortement le nombre de simulations à réaliser.

3.2. Contexte des plans d'expériences…

Selon (Ben, 1994)[17], le contexte d'utilisation des plans d'expérience recouvre les phénomènes de type « boîte noire » que l'on cherche à « éclaircir » pour mieux en comprendre le fonctionnement et en optimiser les performances. Cela impose une connaissance minimale sur le phénomène étudié avant d'entreprendre les essais. On doit être en mesure de lister les paramètres susceptibles d'agir sur le fonctionnement de la boîte noire. Ces paramètres sont les « entrées » appelées par la suite facteurs ou variables. Les performances obtenues sont les « sorties » appelées par la suite réponses :

[17] Cité par (Filfi, 2006)

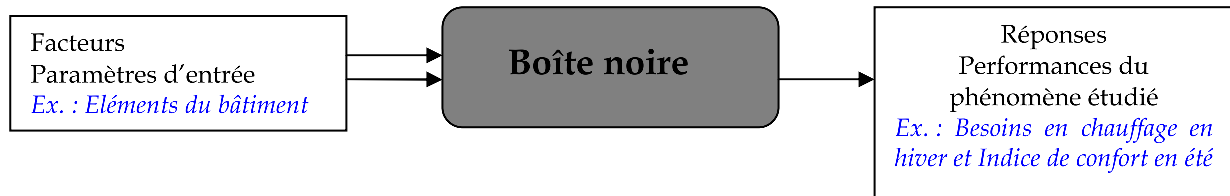


Figure 10. Contexte d'utilisation des plans d'expérience

L'objectif est de chercher à expliquer le fonctionnement de la boîte noire en estimant les réponses pour des combinaisons non réalisées des paramètres d'entrées, à partir des résultats d'essais et / ou de simulations effectués. Le dessein est de trouver une configuration des paramètres d'entrée qui résout le problème.

3.3. Méthodologie des plans d'expériences[18]

En terme sémantique, le rappel de quelques définitions de base est nécessaire pour la compréhension de cette méthode (Fürbringer, 2006)[19] : La réponse correspond à toute manifestation ou conséquence d'un phénomène, une propriété qualitative ou quantitative. C'est une variable dépendante, une conséquence. Tout ce qui a, peut avoir ou est supposé avoir une influence sur le phénomène étudié est appelé facteur. Les facteurs sont considérés comme les causes possibles des réponses. Ce sont des variables indépendantes, des causes. L'état d'un facteur est caractérisé par le niveau. Un facteur peut prendre plusieurs niveaux à l'intérieur de son domaine de variation qui est constitué de toutes les valeurs comprises entre le niveau bas (généralement -1) et le niveau haut (+1).

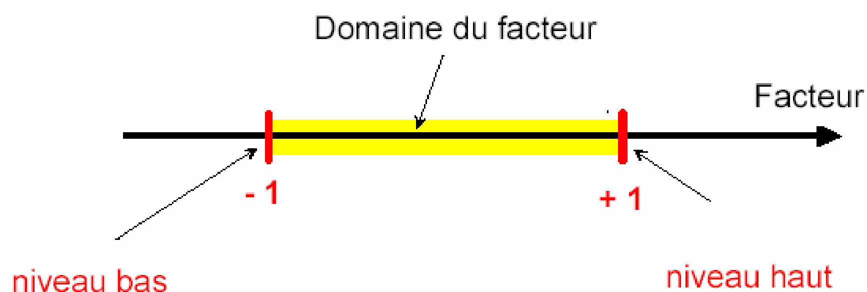


Figure 11. Domaine de variation d'un facteur défini par ses niveaux (Goupy, 2006)

Une variable codée est dite normée. C'est la transformation d'une variable naturelle u en variable codée x par un centrage puis une réduction :

[18] Cette méthodologie est tirée des notes de cours de (Fürbringer, 2006).

[19] (Fürbringer, 2006) Méthodologie des plans d'expériences : Notes de cours, Fürbringer JM., EPFL, Institut de Technique du Bâtiment, Laboratoire d'énergie solaire et de physique du bâtiment, 2006

$$x_j = \frac{u_j - u(0)_j}{\Delta u_j}$$ **Équation 1**

u : variable naturelle x : variable codée
u(0) : centre Δu : pas

La matrice d'expériences dicte les expériences à réaliser. En effet, un plan d'expériences correspond à une matrice d'essais ou d'expériences qui est la liste des combinaisons des niveaux des facteurs définis à l'avance. La matrice d'expériences est constituée de N lignes, k colonnes : matrice dont l'élément x_{ij} est le niveau de la $j^{ième}$ variable codée de la $i^{ième}$ expérience. La différenciation entre les différents types de plans d'expériences se fait souvent selon que les facteurs soient indépendants ou pas. Les plans factoriels, fractionnaires, Hadamard et de Rechtschaffner sont présentés dans cette partie. Pour plus d'informations sur les différents types de plans, le lecteur est invité à se reporter à (Filfi, 2006) ou encore à (Fürbringer, 2006)[20].

3.3.1.Plans factoriels complets

Le plan d'expériences le plus courant dans les laboratoires, consistant à analyser un facteur à la fois, a le grand désavantage de ne pas tenir compte des interactions possibles entre les facteurs. La méthode des plans factoriels permet une amélioration de cette stratégie de recherche expérimentale.

La différence capitale entre les plans factoriels et la méthode classique tient au fait que l'on fait varier les niveaux de tous les facteurs à la fois à chaque expérience, mais de manière programmée et raisonnée. La méthode des plans factoriels est une méthode d'identification pour des modèles additifs avec des interactions (Équation 2).

On distingue les plans par le nombre de niveaux, généralement 2 ou 3, considérés pour les variables. Les niveaux correspondent au nombre de valeurs données à chaque facteur. Habituellement, le nombre de niveaux est le même pour tous les facteurs. Il existe aussi des plans hybrides mélangeant des facteurs à 2 et à 3 niveaux.

Soit un modèle linéaire avec interaction (par exemple le développement de Taylor d'une fonction plus compliquée):

$$R(X) = \alpha_0 + \sum_{i=1}^{N} \alpha_i X_i + \sum_{i \neq j=1}^{N} \alpha_{ij} X_i X_j + \ldots + \alpha_{1..N} X_1 \ldots X_N$$ **Équation 2**

Ce polynôme compte 2^N coefficients a_0, a_i, a_{ij},… et chaque facteur n'apparaît qu'au premier degré. Le plan optimal (du point de vue de l'information) pour déterminer les coefficients du modèle est un plan factoriel. Les coefficients a_0, a_i, a_{ij} sont appelés effets des paramètres *Xi*. On distingue: a_0 : l'effet constant, a_i : les effets principaux a_{ij} : les effets d'interaction du premier ordre, a_{ijk} : les effets d'interaction du deuxième ordre, etc.

Pour explorer un domaine expérimental de *N* facteurs, on ne considère pour chacun que les limites de sa plage de variation. Cela revient à considérer un système de *N* facteurs à 2

[20] (Fürbringer, 2006) Méthodologie des plans d'expériences : Notes de cours, Fürbringer JM., EPFL, Institut de Technique du Bâtiment, Laboratoire d'énergie solaire et de physique du bâtiment, 2006

niveaux qui a donc 2^N états possibles. Il existe plusieurs manières de représenter l'état d'un tel système. Par commodité pour les calculs, l'état d'un facteur sera représenté par un index +1 ou -1 suivant qu'il est dans l'un ou l'autre de ses deux états autorisés (cf. Figure 11). L'état du système est donc entièrement décrit si l'on connaît le vecteur d'état, contenant l'index de chaque facteur, ainsi que les valeurs physiques réelles auxquelles correspondent ces index +1 et -1. Cela est équivalent à centrer et normer les variables du problème (Équation 1).

La nomenclature des plans factoriels est de la forme s^N où *s* est le nombre d'états considérés pour chaque facteur et *N* le nombre de facteurs : ceci correspond au nombre d'expériences du plan. Le nombre de coefficients et d'expériences croît exponentiellement avec le nombre de facteurs. Pour un grand nombre de facteurs, les plans factoriels deviennent vite impraticables et coûteux. Si les coefficients d'interaction des grands ordres peuvent être négligés, du moins dans un premier temps il est possible de n'effectuer qu'une partie du plan qui devient alors un plan factoriel incomplet.

3.3.2.Plans factoriels fractionnaires

Les plans factoriels fractionnaires forment une classe très intéressante des plans factoriels incomplets. Le nombre d'expériences *Ne* d'un plan factoriel fractionnaire est obligatoirement une puissance de 2 afin de conserver les propriétés des matrices factorielles. Le nombre d'expériences correspond ainsi à la classification des plans: *Ne* = *2(N-r)* où *r* est un entier. Dans un plan factoriel complet, toutes les colonnes de la matrice du modèle *M* sont indépendantes les unes des autres. Cette indépendance des colonnes est nécessaire pour garantir la résolution du système d'équation et l'indépendance des coefficients estimés. Dans les plans fractionnaires, puisque les coefficients d'ordres supérieurs sont négligés, il est possible d'utiliser ces colonnes 'libres' pour des facteurs supplémentaires.

3.3.2.1. Plans de Hadamard

Il existe un type de plan d'expériences apparenté aux plans factoriels, appelé plan multifactoriel de Hadamard (Placket & Burman (1943) dans la littérature anglo-saxonne) qui permet une estimation efficace des effets principaux des facteurs d'un système supposé exclusivement additif et donc sans interaction.

Pour estimer les effets principaux de *N* paramètres, un plan de Hadamard nécessite *N*+1 expériences.

Les matrices de Hadamard sont composées, comme les matrices factorielles, de '1' et '-1'. Ces matrices de Hadamard permettent un tri efficace d'un grand nombre de facteurs et évitent un tri sentimental basé sur des *a priori*. Elles constituent une classe de matrices d'expériences orthogonales dédiées au criblage de facteurs à deux niveaux.

Elles n'existent que pour N (nombre d'expériences) = 2 et des valeurs de N multiple de 4. N est appelé : nombre d'Hadamard.

3.3.2.2. Plans de Rechtschaffner

Cette famille de matrices permet d'estimer les effets principaux et les effets d'interactions du premier ordre des facteurs étudiés avec un nombre minimum d'expériences, tous les facteurs étant à deux niveaux. Le principal intérêt de cette matrice est d'être saturée. En d'autres termes, le nombre d'expériences à réaliser est égal au nombre d'estimateurs à calculer. Le modèle à calculer est le suivant :

$$R(X) = \alpha_0 + \sum_{i=1}^{N} \alpha_i X_i + \sum_{i \neq j=1}^{N} \alpha_{ij} X_i X_j$$ **Équation 3**

Le nombre de coefficients à estimer, et donc le nombre d'expériences à effectuer, est fonction du nombre N de facteurs :

$$N_{coeff} = N_e = (N,0) + (N,1) + (N,2) = 1 + N + \frac{N(N-1)}{2}$$ **Équation 4**

En minimisant ainsi le nombre d'expériences, la qualité de l'information s'en trouve clairement diminuée par rapport à une matrice factorielle fractionnaire.

La construction des matrices de Rechtschaffner est basée sur trois générateurs : un par type d'effet.

3.4. Application des plans d'expériences à la rénovation bioclimatique des logements

Face à un logement à rénover (sans intervention sur le gros œuvre), l'état de l'art a permis de réaliser les différents types de travaux possibles. Quand l'homme d'études souhaite installer des solutions bioclimatiques, que peut-il proposer en fonction du bâtiment étudié en un nombre optimum de simulations ?

Nous avons pu apprécier les finalités des plans d'expériences.

L'information que nous souhaitons obtenir est « quels sont les éléments du bâtiments à rénover en priorité en fonction d'indicateurs choisis ? ».

On identifie alors les éléments des bâtiments comme étant les facteurs et les indicateurs comme étant les réponses (besoins en chauffage en hiver et confort adaptatif en été). Les éléments identifiés sont les suivants :

- plancher
- murs
- fenêtres
- ventilation
- toiture.

Une fois ces éléments identifiés, ils sont associés à des solutions climatiques par l'homme d'études.

Les approches de Pareto, Bayesienne et les représentations Half Plot et Normal Half Plot sont retenues pour la présentation des résultats (cf. § 7.2.4 et 7.1.6). Le diagramme de Pareto est un graphique représentant la prépondérance de différentes causes sur un phénomène. Il permet de mettre en évidence les causes les plus importantes sur le nombre total d'effets et ainsi de prendre des mesures ciblées pour améliorer une situation (Wikipedia, 2007). La longueur des barres est proportionnelle à l'importance des effets des facteurs.

L'approche Bayesienne consiste à calculer la probabilité a posteriori que chaque effet soit « actif ». Elle prend en compte deux paramètres : la probabilité a priori qu'un effet soit actif (a) et la connaissance du rapport entre les variances des effets actifs et la variance de l'ensemble des effets non actifs : (k). Pour toutes les combinaisons (a, k), le logiciel calcule la probabilité a posteriori pour chaque effet, d'être « actif ».

Les représentations Half Plot et Normal Half Plot sont représentées dans un système d'axes gausso arithmétique. L'axe vertical est gradué suivant une échelle en probabilité, l'axe horizontal est gradué suivant une échelle arithmétique. Ce type de graphe est utilisé pour vérifier si un ensemble de valeurs suit une distribution normale. Cette vérification se fait uniquement de façon visuelle donc subjective. Le principe de construction de ce type de graphe est très simple : l'ensemble de N valeurs est ordonné suivant l'ordre croissant, (j = rang). Ces N valeurs ordonnées sont ensuite portées sur le graphe en fonction de leur fréquence cumulée observée ((j-0,5)/N).

3.5. Conclusions sur les plans d'expériences

Les plans d'expériences consistent à mettre en œuvre une stratégie de travail dans le but de réduire le nombre des simulations tout en atteignant rapidement les réponses aux questions posées. Dans le cas des plans factoriels, il faut déterminer les effets des paramètres que l'homme d'études juge influents sur le phénomène. Pour cela plusieurs cas sont envisageables et ont été développé dans cette partie. Ils constituent une classe de méthode mathématique qui permet d'estimer et de comparer les effets de facteurs prédéfinis sur un phénomène.

Les modèles établis sont empiriques et valables uniquement dans leur domaine d'étude. Toute extrapolation est périlleuse. Ils n'offrent, certes, pas toujours une représentation physique du problème mais leurs prédictions sont fiables et précises. C'est au moment de l'établissement du plan d'expériences que l'on doit analyser les facteurs supposés influents et leurs interactions éventuelles, c'est-à-dire bien identifier les mécanismes physiques du problème étudié.

Une des finalités des plans d'expériences réalisés sur les bâtiments de référence est de déterminer l'importance relative de chaque élément du bâtiment ainsi que les interactions qui peuvent exister entre ces éléments. Ainsi, les priorités d'interventions sont déterminées. L'homme d'études peut alors associer à ces éléments du bâtiment des solutions appropriées.

Ces différents points s'intègrent dans la méthodologie proposée, décrite dans la partie suivante.

4. PRESENTATION DE LA METHODOLOGIE MEXPER[21]

Dans ce chapitre la philosophie de la méthodologie est développée. Elle répond à la problématique qui est de déterminer les travaux de rénovation à effectuer et par conséquent les dispositifs climatiques à y associer en un nombre minimum de simulations (sans pour autant dégrader l'information à analyser). Ses différentes étapes sont ensuite déclinées. Tout d'abord le bâtiment existant est décrit et ses performances énergétiques sont évaluées. Dans l'objectif d'obtenir les priorités d'interventions avec un nombre minimum de simulations, la méthodologie des plans d'expériences est ensuite appliquée en insistant sur son utilité et son application sur un bâtiment existant. L'étude étant focalisée sur des solutions bioclimatiques, on montre comment elles sont associées aux éléments du bâtiment et la façon dont on peut les dimensionner par une méthode d'optimisation. In fine, les performances de ces solutions sont comparées sur un bâtiment à rénover.

4.1. Introduction

Dans le plan d'étude, nous avons précisé la difficulté préalable de saisir par quel bout prendre ce sujet ! Au départ, parallèlement à la réalisation de l'état de l'art sur les stratégies climatiques (Flory-Celini, 2008), de nombreuses simulations ont été réalisées afin de conduire une analyse de sensibilité sur les éléments d'un bâtiment à rénover. Ainsi, nous avons testé par exemple l'influence de l'augmentation de l'inertie sur les besoins énergétiques, l'influence de différentes protections solaires sur le confort d'été (Flory-Celini *et al*, 2006), nous avons également étudié l'impact du coefficient d'absorption des parois sur le comportement thermique d'un bâtiment. Par ailleurs, nous avons voulu également intégrer l'impact de l'environnement extérieur. Pour ce faire, l'influence d'un bâtiment extérieur (vis à vis) sur le comportement thermique d'un édifice a été analysée (Flory-Celini *et al*, 2005) et nous développons les résultats ci-après en guise d'exemple sur l'influence de l'environnement du bâtiment.

Dans le cadre de la recherche d'une optimisation de la rénovation bioclimatique, la problématique est, dans une situation qui peut sembler défavorable au départ (cas d'un bâtiment à améliorer orienté plein Nord), de tirer partie de l'environnement et des propriétés thermo physiques des matériaux choisis pour augmenter les gains solaires en hiver et éviter le phénomène d'éblouissement en été, source d'inconfort visuel.

---

[21] Méthode experte par les plans d'expériences en réhabilitation.

L'influence d'un bâtiment exposé Sud sur les gains solaires de la façade d'un bâtiment exposée Nord est rarement traitée, configuration que l'on retrouve dans la rénovation d'un bâtiment citadin. Nous avons réalisé un calcul d'éclairement reçu par un vitrage sans masque dans un premier temps, et par la suite avec masque en faisant varier la distance de ce masque, sa hauteur et la valeur de son coefficient de réflexion. Nous avons utilisé le logiciel SOLENE (Miguet, 2000) en analysant, pour une ville considérée, des échanges radiatifs avec l'extérieur notamment l'albédo du sol. SOLENE tient compte de la lumière solaire et d'un modèle de ciel (clair dans notre étude) pour calculer les flux de lumière directe et diffuse.

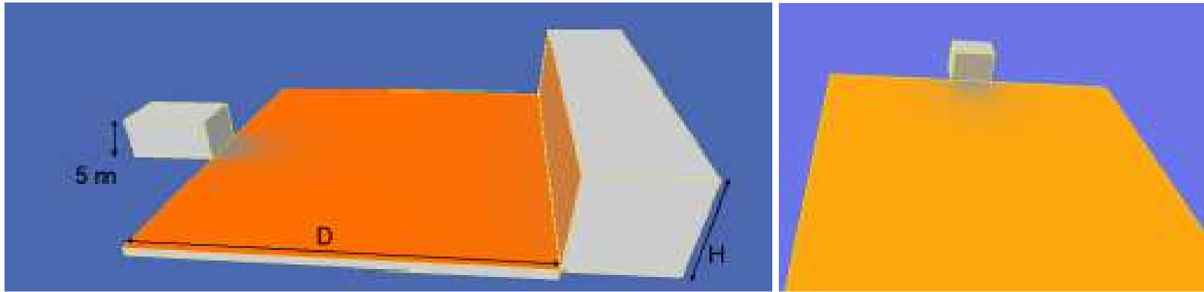


Figure 12. Géométrie du problème avec masque (à gauche) et sans masque (à droite). Le bâtiment étudié est celui dont la hauteur est de 5m (de l'auteur)

Les résultats suivants sont obtenus : Le flux incident sur la surface du bâtiment orienté Nord peut être augmenté de trois manières : en diminuant la distance entre le masque et le bâtiment d'une part, en augmentant le coefficient de réflexion de ce masque par le choix d'une couleur claire et enfin en augmentant l'albédo du sol, cas bien exposé dans la littérature. Nous avons montré que, pour un coefficient de réflexion du vis-à-vis fixé, il existe un rapport D/H (avec D distance entre le vis à vis et le bâtiment étudié et H la hauteur du vis à vis) pour lequel le flux incident lumineux reçu par le bâtiment présente un optimum. La distance D minimum correspondant à celle qui n'engendre pas d'ombre portée sur le « masque » ci celui-ci représente un bâtiment.

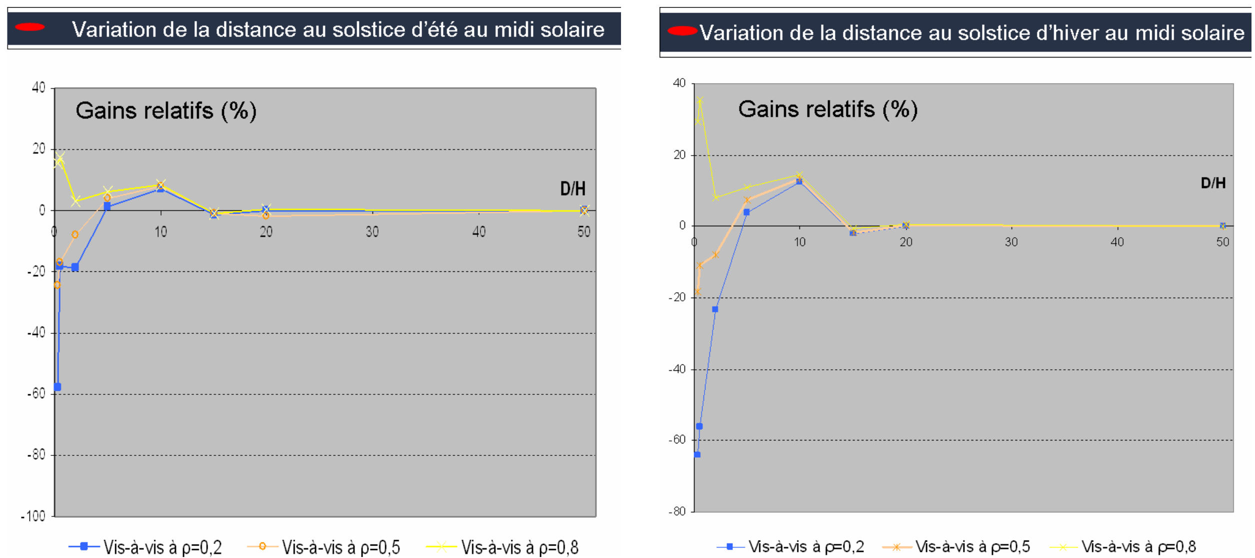


Figure 13. Gains relatifs relevés pour une variation de la distance aux solstices d'hiver et d'été au midi solaire. Les résultats sont indiqués pour un albédo du sol égal à 0,2 correspondant à l'asphalte ou l'herbe. Le coefficient de réflexion ocre (0,5), couleur noire ordinaire (0,2) (Flory-Celini *et al*, 2005)

Ces résultats nous ont permis d'apprécier l'influence de l'environnement. En revanche, ils se limitaient à une configuration !

Comment généraliser cette réflexion (la prise en compte des différents facteurs agissant sur les réponses du bâtiment dans une configuration quelconque) ? L'approche consistant à réaliser une analyse de sensibilité au sens classique du terme, en plus d'engendrer un nombre important de simulations, ne permet pas toujours d'apprécier les interactions entre les phénomènes étudiés.

Par ailleurs, l'état de l'art finalisé a permis de rendre compte de la multitude des stratégies et des solutions climatiques qui en découlent ! De nombreuses interrogations subsistaient notamment sur l'intégration du microclimat et des aspects comportementaux. En outre, une réflexion de fond a été menée sur la caractérisation des bâtiments anciens : quelles sont les caractéristiques thermo physiques des matériaux ? Quels bâtiments étudiés ?

Ces questions ont été abordées lors de différentes présentations au CETHIL et à EDF R&D, avec pour avantage d'avoir une double grille de lecture : une industrielle et l'autre orientée sur la modélisation. Le bâtiment est ainsi vu comme une association d'éléments et l'évaluation des solutions bioclimatiques est réalisée par des outils qui nécessitent leur modélisation. Ceci pousse à s'intéresser à des méthodes permettant de faire un tri parmi de nombreuses solutions et de réduire le nombre de simulations. De ces propositions découlent une interrogation : comment associer ces deux visions ?

4.2. Philosophie de la méthodologie

La méthodologie consiste à décliner les actions réalisables dans le cadre de la rénovation bioclimatique. Il est alors nécessaire de décrire les stratégies climatiques afin de lister les dispositifs bioclimatiques qui s'associent à ces actions, celles-ci étant plus ou moins efficaces en fonction du site et de l'environnement extérieur.

Le travail préliminaire a été de cataloguer, modéliser et positionner entre elles les solutions bioclimatiques dans le résidentiel. Une étude détaillée de ces stratégies est disponible (Flory-Celini, 2008). Les différents dispositifs modélisés par le logiciel de simulation thermique dynamique y sont également présentés (Annexes). En parallèle, nous avons identifié les bâtiments de référence à rénover (cf. § 5.2).

Les limites de l'analyse de sensibilité au sens classique du terme, notamment lorsque les paramètres sont interdépendants, deviennent alors manifestes. L'analyse des performances et du positionnement des solutions requiert en effet de se placer dans un nombre de situations qui devient pratiquement infini si l'on voulait croiser tous les paramètres possibles, ceux liés au site entre autres. En outre, l'installation de certains dispositifs n'est pas pertinente sur tous les bâtiments. Ceci pousse à adopter la méthode des plans d'expériences qui permet de réduire considérablement le nombre de cas à analyser et de trier les différents éléments du bâtiment par ordre d'efficacité.

Les actions efficaces[22] sont alors préconisées selon les résultats énergétiques sur les différents éléments du bâtiment : façades externes, parois internes, toiture, parois transparentes, plancher et la ventilation.

Face à ces actions sont associées des solutions bioclimatiques correspondantes (pour ce faire les meilleures techniques disponibles pour répondre à des procédés de rénovation sont identifiées).

Le dimensionnement de certaines solutions ne s'improvise pas, c'est par exemple le cas de la serre. Nous avons donc opté pour le choix d'une méthode d'optimisation. Elle consiste, en fonction des paramètres caractérisant un dispositif, à réduire une fonction coût (dépendant de paramètres énergétiques).

Le principe de la méthodologie est illustré sur la Figure 14 qui synthétise les différentes étapes déclinées ci-dessous :

La première étape consiste à décrire le bâtiment existant de la façon la plus fine possible (phase 1) et un état des lieux y est réalisé.

En phase 2, l'homme d'études identifie les paramètres (qualitatifs ou quantitatifs) caractérisant les éléments du bâtiment qui pourront avoir une influence sur les réponses étudiées (cette étape nécessite une certaine expertise). Ces facteurs sont les entrées de la méthode mathématique, basée sur des plans d'expériences, qui optimisent le nombre de simulations à effectuer par le biais d'une matrice d'expériences qui dicte à l'homme d'études les simulations à réaliser.

Cette étape concrétisée, les plans sont appliqués avec le logiciel de simulation thermique dynamique dont les sorties considérées dans nos applications sont les besoins en chauffage en hiver (kWh/m²) et les températures en été (phase 3). Notons que l'homme d'études à loisir de choisir le ou les indicateur(s) lui semblant pertinent(s). Ainsi, si un système actif spécifique est identifié, l'homme de l'art peut se baser sur les consommations. Par ailleurs, nous avons opté pour le confort en été car l'approche bioclimatique sous-tend d'éviter l'utilisation de systèmes actifs durant cette période.

Ces expériences déterminent l'influence de la variation des différents facteurs du bâtiment sur les performances thermiques retenues et permettent de dresser un organigramme décisionnel en termes d'interventions énergétiques[23] sur un bâtiment construit avant 1975 (phase 4).

Les facteurs (qui peuvent être les paramètres thermo physiques des éléments du bâtiment) sont ensuite associés à des dispositifs bioclimatiques (phase 5). Si dans le diagnostic du bâtiment, on identifie une solution climatique unique associée à un élément, elle pourra être optimisée directement (flèche en pointillé orange sur la figure). Elle constituera donc le niveau élevé des plans d'expériences.

Le dimensionnement des dispositifs s'effectue par le logiciel d'optimisation qui, selon un critère énergétique et économique, dimensionne les solutions pour répondre à des contraintes d'été et d'hiver (phase 6).

Enfin, une comparaison des performances de ces dispositifs est effectuée (phase 7).

---

[22] Les actions efficaces se situent au niveau de la définition des actions dans la démarche intellectuelle des méthodes d'aide à la décision.

[23] L'enjeu étant, rappelons-le, de répondre à une double exigence : industrielle (pour EDF R&D dont le principal secteur d'activités est l'énergie) et scientifique.

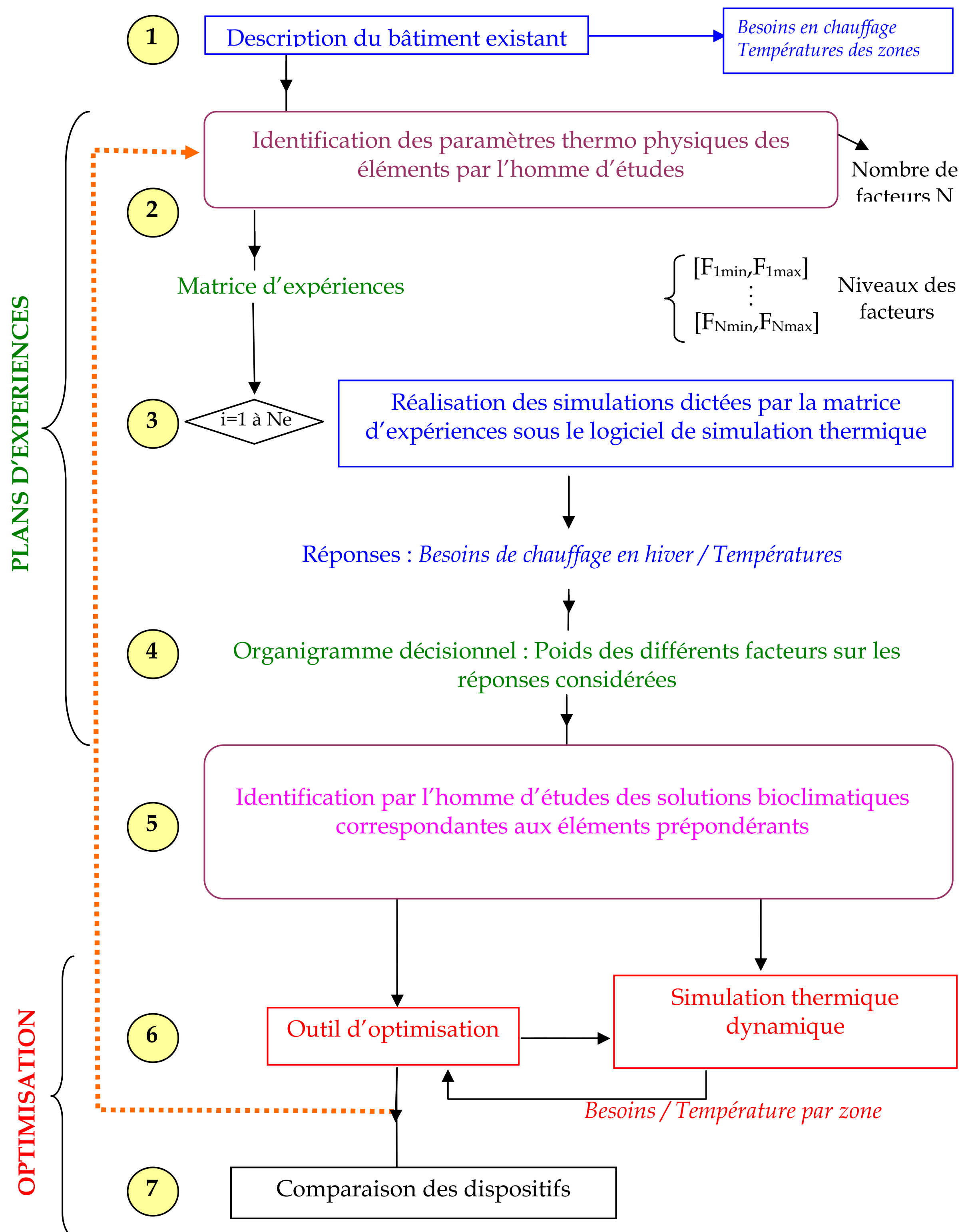


Figure 14. Méthode experte par les plans d'expériences en réhabilitation (MEXPER)

Dans les prochains chapitres, les différentes étapes de la méthodologie MEXPER sont détaillées.

4.3. Phase 1 : Description du bâtiment existant

La première phase consiste à établir une saisie des données du bâtiment à rénover afin de déterminer ses performances thermiques. Pour ce faire, l'homme d'études devra compléter les études concernant la grammaire[24] [25] architecturale ainsi que la caractérisation des matériaux par : l'identification de la zone géographique, la prise en compte des effets de microclimat et notamment des données topographiques, l'analyse de l'environnement du bâtiment (vents dominants notamment) et récupérer le métré s'il en a la possibilité. Une information sur les habitudes des habitants pourra également renseigner les hypothèses comportementales à intégrer au modèle de bâtiment.

La caractérisation de cette grammaire (ou la relation entre les différentes pièces et les matériaux les constituants) pourra s'appuyer sur des ouvrages dépeignant la typologie des bâtiments existants qui sont essentiellement architecturaux tels que (Joffroy, 1999) et (Graulière, 2005) contenant des données plutôt qualitatives (cf. § 5.2 Choix des logements de référence). Cette analyse pourra être complétée par les caractéristiques thermo physiques du bâtiment à rénover tirées du cahier technique du CSTB (Cstb, 1980). Par ailleurs, en termes de technique de construction, un ouvrage (FFB *et al*, 2004) recense les principes constructifs mis en œuvre dans des bâtiments anciens.



Maison de vignerons dans le Beaujolais



Maison bretonne



Mas provençal



Maison Alsacienne

Figure 15. Exemples de typologies de maisons individuelles construites avant 1975 en France (Jusselme, 2007)

---

[24] La grammaire architecturale signifie, selon (Wright, 1995) cité par (Lucan, 2005), la même chose quelle que soit la construction - qu'elle soit faite de mots, ou de pierre et de bois. C'est la relation formelle entre les divers éléments qui constituent le tout. La "grammaire" de la maison est l'articulation manifeste de toutes ses parties. Ce sera le "discours" qu'elle tient.

[25] (Lucan, 2005) La grammaire architecturale : Frank Lloyd Wright (1867-1959), Cours du Prof. Jacques Lucan, Laboratoire de théorie et d'histoire 1, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, http://ltha.epfl.ch/enseignement_lth/documents/j_lucan/cours_III/09_Wright.pdf, 2005

En outre, un rapport commandé par le Ministère de l'emploi, de la cohésion sociale et du logement (Gueyffrier, 2006) recense la plupart des études réalisées sur le bâtiment existant en France découlant sur les questions énergétiques au cours de la décennie écoulée[26]. Ce bilan précise que la caractérisation du bâti reste mal connue et l'on ne sait pas comment se comportent les différents types de bâti…Or cette connaissance est nécessaire pour déterminer les segments de parc prioritaires et les solutions techniques à adopter de manière pertinente. C'est pourquoi la DGUHC a lancé des études destinées à établir une typologie de bâtiments dans le domaine du logement. La réalisation de cette typologie est complexe, les bâtiments construits avant 1975 étant essentiellement caractérisés par une régionalisation architecturale (cf. Figure 15 et Figure 16). A l'heure de la rédaction de ce manuscrit, cette typologie n'est pas disponible. L'idée est de l'exploiter en appliquant la méthodologie aux bâtiments identifiés et de réaliser un nombre de simulations complémentaires afin qu'elle devienne générique.

Cette synthèse peut représenter un annuaire de recherche pour l'homme d'études.



(Minnaert, 2008)



(Energie Cités, 2003)

Figure 16. Exemple de typologie de logements collectifs anciens en France

Dans les applications proposées, la plus grande précision des données a été recherchée, notamment :

- plan de masse
- composition des parois opaques : matériau et épaisseur

[26] Cette synthèse n'intègre pas les études précitées. Elles sont en effet soit à visée architecturale soit antérieure à la décennie écoulée.

- caractéristiques des parois vitrées : simple vitrage, double, double peu émissif ? + menuiserie associée
- mode constructif, pour essayer de déterminer les ponts thermiques (et leur métrage linéaire) et les infiltrations d'air parasites (perméabilité du bâti)
- présence ou non d'un système de ventilation, si oui, lequel (autoréglable, hygroréglable ? ...), présence d'un conduit de cheminée ? si oui avec trappe, sans trappe ?
- présence de végétation ou de masques (bâtiment en vis-à-vis)
- ...

A partir de la description que l'on peut avoir du bâti existant, on arrive à trouver des caractéristiques thermo physiques par défaut qui sont nécessaires aux entrées des modèles. En fait, il s'agit de faire le lien entre les réponses éventuelles au questionnaire bâti que l'on peut obtenir mais qui ne peuvent pas être intégrées simplement directement dans un logiciel de simulation thermique « détaillé » (sauf catalogue de matériaux « pré renseignés »).

Néanmoins, l'état des lieux réaliste d'un bâtiment ancien sous-tend d'autres réflexions, notamment celles concernant le vieillissement des matériaux (quelles sont en effet les caractéristiques thermo physiques d'une fenêtre de plus de vingt ans ?) ou encore les travaux de rénovation partielle qui ont pu être effectués au cours du temps, mais aussi[27] quels scénarii comportementaux retenir ?

L'état de la recherche ne nous permet pas de répondre au premier questionnement pour tous les matériaux utilisés dans le bâtiment. Il n'empêche qu'il demeure toujours possible, dans les perspectives d'évolution, d'intégrer ces éléments a posteriori, une fois que ces informations seront disponibles.

Concernant le deuxième questionnement : la méthodologie proposée se veut être une feuille de route pour le prestataire de rénovation qui aura le loisir de renseigner les rénovations partielles appliquées au bâtiment dans la caractérisation thermique de ce dernier. Plus grandes seront les informations à sa disposition, meilleure sera la modélisation du bâtiment.

Enfin, l'intégration d'hypothèses comportementales est absolument nécessaire. On pourrait ainsi appeler les systèmes proposés des technologies « homo climatiques », pour aller au-delà du préfixe « bio » qui sous-entend la vie dans sa généralité, pour renforcer l'importance de l'implication de l'homme dans l'application de ces stratégies. Ainsi, (Dereymez, 2007) par l'étude d'un bâtiment à haute efficacité énergétique équipé de vérandas solaires, souligne les résultats surprenants sur l'ouverture des fenêtres accolées aux serres durant la période de chauffage. L'auteur remarque que cette ouverture peut aller de 4 à 20 heures par jour et note que cette façon d'agir entraîne malheureusement une diminution de l'efficacité de la véranda qui se devrait d'agir comme un capteur solaire. Ceci est en relation avec l'exploitation des données de consommations du CEREN[28] (cf. 5.2.1) qui montrent que, même après la mise en œuvre des réglementations, les consommations ne diminuent pas forcément, les aspects comportementaux pouvant être une des causes possibles.

[27] Cette remarque est également valable pour un bâtiment neuf.

[28] (Ceren, 2004)

Nombre de contre-performances ont été révélées des retours d'expériences de la période de l'odyssée solaire des années 70 dues notamment aux aspects comportementaux des habitants (Savatier, 2000). Ces retours d'expériences poussent à préconiser, parallèlement aux solutions de rénovation, des séances de sensibilisation et d'information liées à l'utilisation de ces techniques. Actuellement, de nouvelles structures animées par l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie peuvent assurer l'information auprès des particuliers sur des projets innovants, ce sont les Espace Info Energie. C'est le cas du bâtiment précité sur lequel les aspects comportementaux ont pu être mis en évidence grâce à un monitoring sur des appartements concernés.

C'est également dans cette perspective que ce travail de préconisations de solutions bioclimatiques sur l'habitat existant (et sur l'habitat dans sa globalité) devrait être accompagné d'un guide de conseils à destination des futurs utilisateurs de ces technologies. Le travail de formation et d'information est essentiel pour le fonctionnement de tels systèmes.

D'un point de vue pratique, pour le diagnostic d'un bâtiment, l'approche classique consiste à saisir les données par le biais d'un questionnaire à destination des particuliers qui concerne :

- le bâtiment en général : date de construction, typologie, nombre d'occupants
- l'enveloppe du bâtiment
- l'éclairage
- les appareils électroménagers.

L'intégration de solutions bioclimatiques pousse à compléter cette démarche par des éléments d'ordre comportemental du type « Ouverture des fenêtres ou non », mais aussi environnementaux : présence de vis à vis ou non, conditions climatiques, afin de bien reformer le trio « Habitants, Habitat, Habitudes ».

4.4. Phase 2 : Approche par éléments du bâtiment

Le bâtiment est vu comme étant une association d'éléments : plancher, mur extérieur, mur intérieur, fenêtres, toiture, ventilation, éléments extérieurs.

L'homme d'études peut alors caractériser les facteurs qu'il souhaite analyser par plusieurs biais :

- Par une approche qualitative : prenons l'exemple des fenêtres, on peut considérer en niveau bas, les anciennes fenêtres, en niveau haut : des fenêtres performantes.
- Par une approche quantitative : en associant un ou plusieurs paramètre(s) thermo physique(s) (indépendants) à un élément. Quelques paramètres thermo physiques sont recensés dans le tableau suivant :

Tableau 7. Exemple de paramètres thermo physiques associés aux différents éléments (de l'auteur)

Eléments	**Paramètres thermo physiques**	**Symboles**	**Unités**
Fenêtres	Transmission lumineuse	Tl	-
	Facteur solaire	g	-
	Coefficient de déperditions	U	W/(m².K)
Murs Toiture Plancher	Coefficient d'absorption	α	-
	Conductivité thermique	λ	W/(m.K)
	Capacité	c	J/(kg.K)
	Masse volumique	ρ	kg/m³
	Coefficient de déperditions	U	W/(m².K)
Ventilation	Débit	$\dot{m}$	kg/h

Par ailleurs, il peut ajouter un niveau intermédiaire aux niveaux haut et bas, avec pour conséquence l'augmentation du nombre de simulations. Ainsi, si on considère un plan factoriel complet où 7 facteurs sont à analyser, avec deux niveaux, il faut réaliser 128 simulations tandis qu'avec 3 niveaux, on passe à 2187 simulations : on multiplie ainsi le nombre de simulations par plus de 17 ! Ceci étant, ce passage de 2 à 3 niveaux peut être nécessaire pour détecter, et au besoin quantifier, les non linéarités.

L'analyse des rénovations effectuées en France (cf. § 1) montre qu'elles portent essentiellement sur l'enveloppe du bâtiment. Nous avons donc distingué deux catégories de solutions : celles qui portent directement sur l'enveloppe et celles qui sont des éléments ajoutés (serre, mur capteur accumulateur, puits canadien) que nous nommons « systèmes ». La première catégorie s'intègre directement dans les niveaux des plans d'expériences. La deuxième, qui se situe généralement au niveau de rénovation 2 ou 3, est identifiée en fonction des résultats des plans d'expériences.

En outre, une solution bioclimatique peut être identifiée au préalable sans autre alternative. Pour ce faire l'homme d'études se doit de connaître les solutions associées aux différents éléments. Elles sont recensées dans les tableaux suivants (ces tableaux ne se veulent pas exhaustifs, mais proposent une diversité de choix de solutions).

Sur chaque élément du bâtiment, les différentes stratégies bioclimatiques associées sont listées ainsi que les dispositifs correspondants. L'approche bioclimatique consiste certes à étudier la structure même du bâtiment, mais également l'impact du climat et de l'environnement sur son comportement. Ceci sous-tend que les éléments extérieurs tels que la végétation, les bâtiments avoisinants, etc. se doivent d'être analysés. Ils figurent donc en « élément » extérieur !

Tableau 8. Association des stratégies et dispositifs climatiques aux façades transparentes (de l'auteur)

Stratégies	Eléments	Actions	Dispositifs
Ventilation naturelle	Fenêtre	Régler des ouvertures dans les fenêtres existantes	Ouvertures auto ou hygro réglables
	Fenêtre	Changer pour de nouvelles fenêtres avec ouvertures	Fenêtre performante (cf. annexes) avec ouverture auto réglable
Captage de l'énergie solaire	Fenêtre	Changer pour un nouveau type de fenêtre ou de vitrage	Fenêtre performante
Stockage de la chaleur	Fenêtre	Augmenter l'inertie de la fenêtre	Fenêtre à MCP (cf. annexes)
Conservation de la chaleur	Fenêtre	Isolation : Améliorer les performances thermiques des fenêtres	Vitrage peu émissif
			Ajouter une isolation mobile
		Améliorer l'étanchéité à l'air	Nouveaux vitrages à basse émissivité
Contrôle des apports solaires	Fenêtre	Diminuer les apports solaires en créant de l'ombrage	Vitrage rejetant la chaleur
			Dispositifs d'ombrage mobiles
Distribution de l'énergie			
L'éclairage naturel	Fenêtre	Capter	Nouveau type de fenêtre ou de vitrage
			Fenêtres auto ombrantes (Light shelf)
	Fenêtre	Distribuer	Fenêtres auto ombrantes
	Fenêtre	Contrôler	Vitrage spécial
			Fenêtres auto ombrantes
			Dispositifs d'ombrage fixes
			Dispositifs d'ombrage mobiles

Tableau 9. Association des stratégies et dispositifs climatiques à la toiture (de l'auteur)

Stratégies	Eléments	Actions	Dispositifs climatiques
Ventilation naturelle	Fenêtres de toit (type velux	Installer des ouvertures réglables dans les fenêtres existantes	Fenêtres de toit
		Installer des fenêtres avec ouvertures	Fenêtres de toit ventilées
	Ventilation	Favoriser la circulation de l'air par la toiture	Conduits de ventilation
			Extracteurs aérauliques
			Sablières de ventilation
			Systèmes de cheminées
			Composants de ventilation par faîtage de toiture
Captage de l'énergie solaire	Fenêtres	Installer des fenêtres Augmenter le nombre ou la surface des fenêtres	Fenêtres
Stockage de la chaleur	Inertie	Augmenter l'inertie de la toiture	Toitures végétalisées
			Toitures bassin
			MCP
Conservation de la chaleur	Isolation de la toiture	Améliorer les performances thermiques des murs et des toitures	Isolants performants
	Etanchéité à l'air de la toiture	Calfeutrer, étanchéifier l'enveloppe	Calfeutrement
Contrôle des apports solaires	Fenêtres	Diminuer la surface des apports solaires	Fenêtres plus petites
		Rejeter la chaleur	Fenêtres réfléchissantes
		Diminuer les apports solaires	Dispositifs d'ombrage fixes
			Dispositifs d'ombrage mobiles
Distribution de l'énergie	Couplage de la toiture aux autres zones	Favoriser le couplage direct entre les espaces capteurs et les espaces à chauffer	Fenêtres
		Favoriser la thermo circulation. Ajouter ou modifier le cloisonnement, les relations, les ouvertures entre les pièces	Puits de lumière
			Mezzanine
		Installer une circulation d'air ou d'eau à travers des tuyaux (Distribution mécanique)	Tuyaux
L'éclairage naturel – Capter	Fenêtres en toiture	Installer des fenêtres. Augmenter le nombre ou la surface des fenêtres	Fenêtres
		Installer un nouveau type de fenêtre ou de vitrage	Fenêtres
L'éclairage naturel – Contrôler		Diminuer le nombre de fenêtres	Fenêtres
		Diminuer la surface des apports solaires	Fenêtres
		Diminuer les apports solaires	Dispositifs d'ombrage mobiles

Tableau 10. Association des stratégies et dispositifs climatiques aux façades opaques (de l'auteur)

Stratégies		Eléments	Actions	Dispositifs
Ventilation naturelle		Murs	Créer des ouvertures	Bouches d'aération
Captage de l'énergie solaire		Fenêtres	Augmenter le nombre ou la surface des fenêtres	Fenêtres
			Installer des fenêtres	Fenêtres
		Espace capteur	Installer un espace vitré supplémentaire	Balcon vitré
				Galerie vitrée / Serre / Capteur à air
				Installation d'un mur capteur accumulateur
		Murs	Améliorer la captation de l'énergie par les murs	Réflecteurs
Stockage de la chaleur		Cloisons interzones	Modifier les matériaux de construction (+ revêtement) des murs ou du sol	Masse
		Cloison légère	Rajouter un volume de stockage intégré ou séparé	Matériaux à changement de phase
Conservation de la chaleur		Façades extérieures	Améliorer les performances thermiques des murs et des toitures	Isolant, végétalisation des parois
			Ajouter une nouvelle enveloppe	Matériaux d'isolation transparents
		Fissures présentes sur les façades	Calfeutrer, étanchéifier l'enveloppe	
Contrôle des apports solaires		Fenêtres	Diminuer la surface des apports solaires	Fenêtres plus petites
		Façades extérieures	Diminuer les apports solaires	Dispositifs d'ombrage fixes ou mobiles
Distribution de l'énergie		Façades opaques	Intégrer un espace vitré supplémentaire.	Galerie vitrée
			Favoriser la distribution naturelle et le couplage direct entre les espaces capteurs et les espaces à chauffer	Mur trombe
			Favoriser la distribution mécanique et la circulation d'air ou d'eau à travers des tuyaux	Tuyaux
L'éclairage naturel	Capter	Façades extérieures	Augmenter la surface des apports solaires	Fenêtres
	Distribuer	Façades opaques	Optimiser la position et la taille des fenêtres en fonction de l'espace et de l'orientation	Fenêtres
			Traiter la surface en augmentant la luminosité	Revêtement surfaces intérieures
	Contrôler	Fenêtres	Diminuer la surface des apports solaires	Fenêtres
		Ombrage	Diminuer les apports solaires	Dispositifs d'ombrage fixes
				Dispositifs d'ombrage mobiles

Tableau 11. Association des stratégies et dispositifs climatiques aux façades internes (de l'auteur)

Stratégies	Eléments	Actions	Dispositifs
Ventilation naturelle	Ouvertures dans les parois internes	Modifier les relations entre les pièces Décloisonner	Puits de lumière Mezzanine
Captage de l'énergie solaire	Espace capteur	Installer un espace vitré supplémentaire	Fenêtres
Stockage de la chaleur	Cloisons internes opaques	Augmenter la surface exposée	
		Modifier l'épaisseur des murs ou du sol	
		Modifier les matériaux de construction (+ revêtement) des murs ou du sol	
	Volume de stockage Intégré ou séparé	Augmenter le stockage de chaleur dans les parois internes	Système à eau
			Lit de pierres
			MCP
Conservation de la chaleur	Parois internes	Conservation : Zonage thermique	Création d'espaces tampons
	Bâtiment	Diminuer le rapport Surface/Volume (Compacité)	Addition de nouveaux volumes
Contrôle des apports solaires	Ouvertures internes	Limiter l'éblouissement	Dispositifs d'ombrage mobiles
Distribution de l'énergie	Ouvertures dans les parois internes	Favoriser le couplage direct entre les espaces capteurs et les espaces à chauffer	Espace vitré supplémentaire
		Favoriser la Thermo circulation. Ajouter ou modifier le cloisonnement, les relations, les ouvertures entre les pièces	Puits de lumière
			Mezzanine
		Favoriser la circulation d'air ou d'eau à travers des tuyaux (Distribution mécanique)	Tuyaux
L'éclairage naturel	Revêtement surfaces intérieures	Traiter la surface des façades en augmentant la luminosité afin de distribuer l'éclairage naturel : diminution du coefficient d'absorption des parois	Peinture, papier peint de couleur et texture appropriées

Tableau 12. Association des stratégies et dispositifs climatiques à la ventilation (de l'auteur)

Stratégies	Eléments	Actions	Dispositifs
Ventilation naturelle	Fenêtres	Favoriser la ventilation nocturne par ouverture des fenêtres[29]	Fenêtres
		Ouvrir pour favoriser la circulation de l'air	Ouvertures auto réglables
	Parois internes	Décloisonner pour favoriser la circulation de l'air	
	Sous-sol	Préchauffage ou refroidissement de l'air par le sol	Puits canadien Cave
Captage de l'énergie solaire	Plancher, façades opaques et fenêtre	Favoriser le tirage thermique	Cheminée solaire
Stockage de la chaleur	Sol	Bénéficier de l'inertie du sol	Puits canadien
Conservation de la chaleur	Sol	Bénéficier de l'inertie du sol	Lit de pierres
Contrôle des apports solaires			
Distribution de l'énergie	Plancher, façades opaques et fenêtre		Tour à vent
			Cheminée solaire
L'éclairage naturel	Conduit réfléchissant	Favoriser la circulation de l'air par tirage thermique dans le puits de lumière	Puits de lumière

Tableau 13. Association des stratégies et dispositifs climatiques aux éléments extérieurs (de l'auteur)

Stratégies	Eléments
Ventilation naturelle	La végétation peut modifier la circulation du vent autour du bâtiment
	Echangeur air / sol : Puits canadien, cave
Captage de l'énergie solaire	Installation de réflecteurs sur le sol
	Plans d'eau
Stockage de la chaleur	Installation de lits de pierre dans le sol
Conservation de la chaleur	
Contrôle des apports solaires	Végétation
	Masques avoisinants
Distribution de l'énergie	
L'éclairage naturel	Réflecteur

29 Cette stratégie est tributaire de la zone géographique, de la morphologie du bâtiment mais également de son environnement (elle n'est pas souhaitable par exemple dans un environnement bruyant).

4.5. Phase 3 : Réalisation des plans d'expériences sur le bâtiment existant

Les facteurs et leurs niveaux ayant été définis, selon la finalité de l'analyse et le nombre de facteurs N à étudier, l'homme de l'art dispose de plusieurs plans à sa disposition. Nous en avons décrit quelques uns dans la partie réservée à cet effet (cf. 3). Dans la description du contexte des plans d'expériences nous avons noté qu'ils se définissaient par des facteurs, mais également par des réponses. Les réponses retenues sont décrites dans la deuxième partie de ce chapitre.

4.5.1. Choix du plan

Plus que d'être utilisés comme un outil clé en main, les plans d'expériences devraient être intégrés dans une démarche globale (notamment en milieu industriel). Différents plans ont été présentés dans la partie précédente. Rappelons que l'objectif de la méthode appliquée à des simulations est d'obtenir un maximum d'informations avec un minimum de simulations. Une organisation systémique des simulations accélérant l'obtention des résultats en diminuant conjointement le risque d'erreur.

Le choix de plan dépend de l'objectif de l'étude. Il se fait souvent selon que les facteurs soient indépendants ou pas. On distingue trois catégories principales :

- les plans qui permettent de détecter les facteurs influents : il est possible d'effectuer un premier tri parmi de nombreux facteurs en déterminant ceux qui influent le plus sur une réponse.
- les plans qui permettent d'optimiser un process : possibilité de déterminer les effets principaux et les effets d'interaction. L'ordre de ces effets d'interaction va dépendre de la sous-catégorie de plan retenue.
- les plans de mélange : plans permettant d'étudier les facteurs dépendants.

Il existe des catalogues de plans d'expériences. Si le plan que l'on souhaite réaliser n'existe pas, il est toujours possible de le construire à la main.

Le choix du plan peut être également borné par des contraintes temporelles. Il se peut que l'homme d'études, comme c'est souvent le cas, soit limité dans le temps qui lui est imparti. Il doit alors trouver un bon compromis entre temps de calcul et la commodité d'analyse de l'information. Ainsi un plan de Hadamard nécessite peu d'expériences, mais l'interprétation des résultats n'est pas toujours aisée. Le Tableau 14 compare pour les plans retenus, le nombre de simulations nécessaire. Pour un faible nombre de facteurs (≤3), l'analyse de sensibilité au sens classique du terme peut suffire[30].

[30] En revanche, elle ne fournit pas une exploitation directe des résultats. C'est à l'homme d'études de la réaliser.

Tableau 14. Nombre d'expériences à réaliser en fonction du nombre de facteurs et du mode expérimental retenu (N est le nombre de facteurs) (de l'auteur)

Nombre de facteurs	Nombre de simulations		
	Plans de Hadamard	Plans de Rechtschaffner	Plans factoriels complets
N	N+1[31]	N+1+N(N-1)/2	2^N
2	4	4	4
3	4	7	8
4	8	11	16
5	8	16	32
6	8	22	64
7	8	29	128
8	12	37	256
9	12	46	512
10	12	56	1024
11	12	67	2048
12	16	79	4096
13	16	92	8192
14	16	106	16384
15	16	121	32768
16	20	137	65536
17	20	154	131072
18	20	172	262144
19	20	191	524288
20	24	211	1048576

4.5.2. Choix des réponses

Une modélisation fine du comportement du bâtiment est nécessaire pour réaliser son diagnostic d'une part et optimiser sa rénovation au regard des besoins de chauffage et du confort d'été d'autre part. Nous avons retenu deux indicateurs pour caractériser les périodes étudiées : les besoins en chauffage (en kWh/m²) pour la saison froide et un indice de confort d'été[32].

4.5.2.1. Besoins en chauffage en hiver

Cette réponse a été choisie du fait que la plupart des logements résidentiels sont chauffés en France durant la période froide. L'objectif est tout d'abord d'évaluer les besoins de chauffage du bâtiment existant puis de proposer des solutions les minimisant.

En thermique de l'habitat, pour calculer les besoins de chauffage (ou de climatisation), il est nécessaire de réaliser un bilan thermique. Ce bilan peut être simple ou compliqué selon ce que l'on recherche. Dans l'approche retenue, le bilan devra intégrer les déperditions des parois (intégration de l'enveloppe), les pertes aérauliques (fissures et infiltrations parasites

[31] Le nombre de Hadamard est un multiple de 4.

[32] Inspiré d'une méthode UCRES (Miriel *et al*, 2002) développé par le CSTB.

fréquentes sur les bâtiments anciens), mais également d'autres considérations comme les apports solaires et internes.

Plusieurs modèles existent pour se représenter et modéliser les phénomènes thermiques mis en jeu dans le bilan du bâtiment. Ils intègrent généralement la combinaison des trois modes de transfert thermique : la conduction à travers les parois pleines ou opaques, la convection dans l'air et le rayonnement en particulier à travers les surfaces vitrées.

Pour ce faire, le modèle retenu devrait intégrer, afin de diagnostiquer au mieux les bâtiments étudiés, les caractéristiques thermo physiques des éléments de l'enveloppe, le traitement des ponts thermiques, la gestion des apports solaires et internes, l'étanchéité du bâtiment, les phénomènes de ventilation naturelle. Il doit être capable de quantifier à l'avance les impacts des solutions de rénovation proposées sur les besoins de chauffage (mais également sur le confort d'été). C'est là l'intérêt de la simulation thermique dynamique.

La simulation thermique dynamique simule au pas de temps horaire le métabolisme du bâtiment en fonction de la composition de ces parois, de la météo, de l'occupation des locaux. Par ce biais, l'homme d'études peut accéder (entre autre) aux besoins de chauffage/climatisation et aux températures heure par heure dans les différentes zones prédéfinies du bâtiment. La simulation thermique dynamique permet de prendre en compte l'inertie thermique du bâtiment, les ponts thermiques, le comportement des usagers et des solutions proposées sur les différentes réponses retenues et notamment les besoins de chauffage. Ces dernières remarques justifient que la détermination des besoins (et des autres réponses) est spécifique à l'outil de simulation thermique du bâtiment choisi.

Une autre réponse pourrait être l'amélioration du confort d'hiver. Vu l'utilisation fréquente de systèmes actifs, (Afnor, 2007) propose de baser les critères d'ambiance thermique sur les indicateurs de confort thermiques PMV-PPD (Predicted Mean Vote : Vote moyen prévisible — Predicted Percentage of Dissatisfied : Pourcentage prévisible d'insatisfaits) avec des niveaux types données d'activité et d'isolation thermique des vêtements. Dans la caractérisation du confort d'été, nous avons retenu l'approche adaptative et nous en justifierons les raisons.

4.5.2.2. Indice de confort d'été

Plusieurs approches peuvent caractériser le confort : le polygone de confort[33], le nombre d'heures supérieures à un certain seuil (généralement en été), le PPD, le PMV ou encore l'approche adaptative. Les deux dernières sont les prévalentes selon (Energy Agency, 2007).

Pour la caractérisation du confort d'été, une première analyse a été effectuée avec le PMV et des résultats surprenants étaient obtenus : ainsi, sur une maison individuelle située à Marseille, on trouvait qu'en juillet, il valait mieux appliquer la ventilation nocturne seule qu'associer la ventilation nocturne à l'adjonction de matériaux à changement de phase dans les cloisons légères (les MCP étant censés déphaser la restitution de chaleur et la ventilation nocturne les décharger). En se replongeant dans la littérature, il s'est avéré que l'indice de Fanger ne correspondait pas à des stratégies de ventilation naturelle, son domaine de validité se restreignant, entre autre, à des vitesses inférieures à 0,2m/s. Dans sa thèse de doctorat (Moujalled, 2007) confirme les résultats obtenus soulignant l'incapacité de l'indice

[33] Cette approche a été utilisée dans le cadre d'une communication présentée à Cisbat 2007 (Flory-Celini *et al*, 2007) qui consistait à comparer des stratégies de ventilation naturelle sur une maison individuelle.

PMV de représenter le confort thermique dans les bâtiments à ventilation naturelle, précisant que le PMV surestime, sur les bâtiments étudiés dans le cadre de cette étude, la sensation de chaleur en été et l'a sous-estime en hiver. (Energy Agency, 2007) précise par ailleurs qu'il est nécessaire de bien tenir compte, même pour le cas de systèmes actifs, du domaine de validité de l'approche de Fanger indiqué dans la norme ISO 7730[34]. Pour des bâtiments ventilés naturellement, l'approche adaptative semble la mieux adaptée ((Moujalled, 2007), (Afnor, 2007), (Energy Agency, 2007)).

Plusieurs modèles de confort adaptatif ont été développés. Pour intégrer cette approche, nous avons, après avoir considéré celle de De Dear[35] ((De Dear et al, 2002) cité par (Energy Agency, 2007)), retenu le calcul proposé dans la norme NF EN 15251 (Afnor, 2007), qui elle, retient un lissage journalier pour les bâtiments non climatisés[36] comme indiqué dans l'Equation 5. (Afnor, 2007) indique les températures intérieures acceptables «en été» (saison de rafraîchissement). Elles sont présentées pour les bâtiments non climatisés sur la Figure 17[37]. Ce modèle de confort est retenu, les coefficients utilisés correspondant aux climats français (Métropole) contrairement à l'approche de De Dear.

Les températures opératives intérieures permises de la figure sont représentées en fonction de la température journalière en moyenne glissante θ_{rm}. Ceci est défini comme la fonction de la moyenne pondérée exponentiellement de la température extérieure journalière :

$$\theta_{rm} = (1-\alpha)\cdot\{\theta_{ed-1} + \alpha\cdot\theta_{ed-2} + \alpha^2\cdot\theta_{ed-3} + \ldots\}$$ **Equation 5**

Cette équation peut être simplifiée comme suit :

$$\theta_{rm} = (1-\alpha)\cdot\theta_{ed-1} + \alpha\cdot\theta_{rm-1}$$ **Equation 6**

θ_{rm} : Température moyenne glissante du jour (pour 24h)
θ_{rm-1} : Température moyenne glissante de la veille
θ_{ed-1} : Température moyenne journalière extérieure de la veille
θ_{ed-2} : Température moyenne glissante extérieure de l'avant-veille, etc.
α : Constante comprise entre 0 et 1. La valeur recommandée est 0,8 et est retenue dans cette étude.

Les limites de températures (estivales) présentées sur cette figure sont essentiellement établies sur des études menées dans des bâtiments de bureaux. Cependant, basé sur la connaissance générale sur le confort thermique et les réponses humaines, on peut supposer que les limites peuvent s'appliquer à d'autres bâtiments (comparables) où les activités sont principalement sédentaires comme les logements. Les possibilités d'adaptation (du comportement) sont relativement nombreuses, en particulier dans les logements : l'une

34 Le vote moyen prévisible est fortement dépendant du métabolisme et du pouvoir isolant des vêtements. Il est difficile de prévoir ces variations dans n'importe quelle situation réelle. L'utilisateur du PMV est par conséquent forcé de faire des hypothèses au sujet de la future vêture des personnes et de leur activité basées sur très peu d'informations.

35 Qui tient compte des moyennes mensuelles de la température.

36 Selon cette norme, les bâtiments non climatisés sont les bâtiments non équipés de climatisation et pour lesquels la réduction des températures intérieures élevées en saison chaude repose sur d'autres techniques telles que taille modérée des fenêtres, protections solaires adéquates, utilisation de la masse du bâtiment, ventilation naturelle, ventilation nocturne, etc., en prévention des surchauffes.

37 Les températures opératives (températures de la pièce) présentées sont valables pour des immeubles de bureaux ou autres bâtiments de types similaires destinés essentiellement à l'occupation humaine avec des activités essentiellement sédentaires et des pièces où il est facile d'accéder à des fenêtres ouvrables et où les occupants peuvent librement adapter leurs vêtements aux conditions thermiques intérieures et/ou extérieures.

d'entre elles relativement aisée est d'adapter le métabolisme et la quantité de vêtements portés en fonction des conditions climatiques extérieures et des températures intérieures.

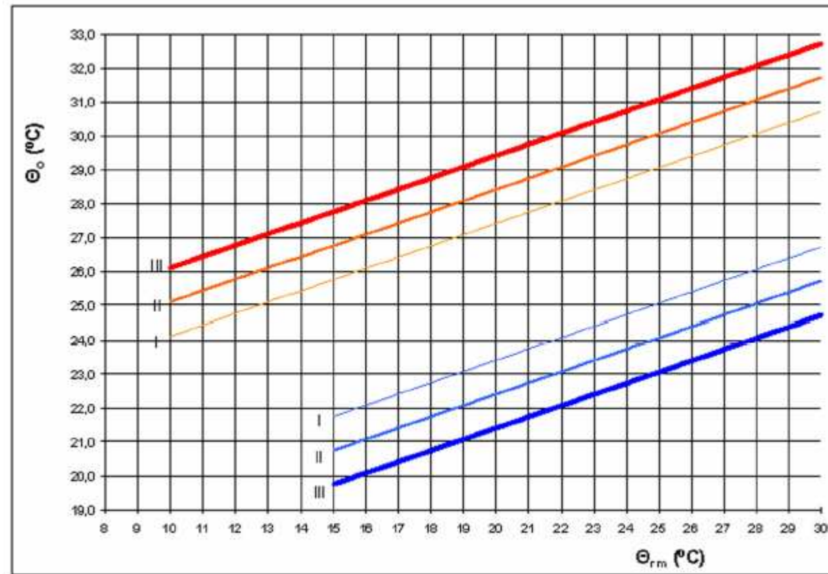


Figure 17. Valeurs de base de la température opérative intérieure θ_0 pour des bâtiments non climatisés - fonction d'une température extérieure en moyenne glissante pondérée exponentiellement θ_{rm} (Afnor, 2007)

La Figure 17 inclut 3 catégories de limites de température pour l'utilisation de la norme. Les valeurs d'entrée recommandées sont données pour chacune des différentes catégories. Une brève description des catégories est donnée dans le Tableau 15 contenant également les équations des droites de la figure.

Tableau 15. Catégories de limites de température pour l'utilisation la norme NF EN 15251

Catégorie	Explication	Expression[38]
I	Niveau élevé attendu qui est recommandé pour les espaces occupés par des personnes très sensibles et fragiles avec des exigences spécifiques comme des personnes handicapées, malades, de très jeunes enfants et des personnes âgées.	Limite basse : $\theta_{imin} = 0{,}33 \cdot \theta_{rm} + 18{,}8 - 2$ Limite haute : $\theta_{imax} = 0{,}33 \cdot \theta_{rm} + 18{,}8 + 2$
II	Niveau normal attendu qu'il convient d'utiliser pour les bâtiments neufs et les rénovations.	Limite basse : $\theta_{imin} = 0{,}33 \cdot \theta_{rm} + 18{,}8 - 3$ Limite haute : $\theta_{imax} = 0{,}33 \cdot \theta_{rm} + 18{,}8 + 3$
III	Niveau modéré acceptable attendu qui peut être utilisé dans les bâtiments existants.	Limite basse : $\theta_{imin} = 0{,}33 \cdot \theta_{rm} + 18{,}8 - 4$ Limite haute : $\theta_{imax} = 0{,}33 \cdot \theta_{rm} + 18{,}8 + 4$
IV	Valeurs en dehors des critères des catégories ci-dessus. Il convient que cette catégorie soit acceptée seulement pour une partie restreinte de l'année.	

38 θ_i : Limite de la température opérative intérieure ; °C
θ_{rm} : Température journalière extérieure glissante moyenne. Ces limites s'appliquent pour la limite haute si 10 °C < θ_{rm} < 30 °C et pour la limite basse si 15 °C < θ_{rm} < 30 °C. Au-dessus de 25 °C, ces graphes sont basés sur une base de données restreinte.

L'indice de confort est calculé de la façon suivante en fonction des catégories prédéfinies :

1- Calculs des plages de confort. La procédure calcule 4 plages de confort A, B, C et D centrées autour d'une zone de confort. Les plages de confort sont construites de la manière suivante :



Figure 18. Définition des plages de variation de l'indice de confort en été

2- La procédure calcule la fréquence d'occurrence des différentes plages de confort : La procédure ne tient compte que des heures où le bâtiment est occupé, en effet la notion de confort n'a de sens qu'en présence d'occupants. A partir des estimations des températures heure par heure calculées, la procédure calcule le nombre d'heures passées dans l'année dans les plages de confort A, B, C et D. Ces fréquences d'occurrence sont notées f_A, f_B, f_C et f_D.

3- Construction de l'indice de confort à partir de ces fréquences d'occurrence. Il s'obtient par la formule suivante (Azard *et al*, 2007) :

$$I_k = 100 - 56 \times \frac{\ln(1 + 3 \cdot f_B + 15 \cdot f_C + 60 \cdot f_D)}{\ln(10)}$$ **Equation 7**

Ces deux indicateurs (besoins en chauffage et indice de confort) sont calculés pour chacune des expériences. Les résultats sont ensuite indiqués dans la matrice d'expériences.

4.5.3. Résultats des plans d'expériences

Pour chaque réponse considérée, la matrice d'expériences est renseignée. L'outil utilisé pour les plans d'expériences peut alors permettre la visualisation des résultats sous forme de différentes sorties qui découlent d'exploitations statistiques.

Une matrice d'expériences est un objet mathématique qui représente, sous forme codée ou normée, l'ensemble des expériences à réaliser. C'est un tableau de N lignes, correspondant aux N expériences, et de k colonnes, correspondant aux k variables étudiées. L'élément x_{ij} de la matrice ainsi formée correspond au niveau que prend la $j^{ème}$ variable (codée ou normée) à la $i^{ème}$ expérience.

Une matrice d'expériences a une structure qui permet d'obtenir les informations que l'on demande avec une qualité suffisante. La structure d'une matrice d'expériences dépend de l'objectif poursuivi quel que soit le domaine d'application. Par contre, il est nécessaire de transformer cette matrice d'expériences (exprimées en variables sans dimension) en plan d'essais qui décrit explicitement les expériences que l'on doit faire.

Un plan d'expérimentation ou plan d'essais est la "traduction" d'une matrice d'expériences en variables naturelles. C'est donc un tableau contenant des données directement utilisable par l'expérimentateur. Ce tableau est, comme la matrice d'expériences, constitué de N lignes et de k colonnes. Chacun de ses éléments U_{ij} correspond au niveau que prend la $j^{ème}$ variable naturelle à la $i^{ème}$ expérience.

Dans la matrice d'expériences, les colonnes sont souvent désignées par Xj, dans le plan d'expérimentation, les colonnes sont souvent désignées par Uj.

Une fois les expériences dictées par la matrice d'expériences, on renseigne les vecteurs correspondants dans le plan d'expérimentation. L'outil de réalisation des plans d'expériences peut alors proposer plusieurs sorties selon le plan retenu. Selon l'information recherchée, l'homme d'études choisira le type de sorties désiré. Ainsi, plusieurs restitutions graphiques des effets des facteurs peuvent être disponibles, quelques uns sont cités ci-dessous :

- le graphe de Pareto
- le graphe des effets directs et des interactions
- le graphe Bayesien.

Ces différentes sorties permettent de jauger l'influence des différents facteurs sur un processus étudié, mais également les interactions qui peuvent exister entre ces facteurs. Des exemples de ces sorties sont présentés dans la mise en œuvre de la méthodologie (cf. § 7.1.6.2, 7.1.6.3, 7.2.4.2 et 7.2.4.3).

L'avantage de l'exploitation des résultats de simulation par les plans d'expériences réside également dans le fait que par une analyse statistique, on peut vérifier les modélisations qui peuvent contenir des erreurs. Cette opération est possible par l'analyse des résidus qui correspondent à la variation des réponses restant inexpliquées. Une forte valeur de résidu peut signifier une erreur dans un essai.

Le poids des coefficients déterminés à cette étape permet de dresser un organigramme décisionnel en termes d'interventions sur le bâtiment.

4.6. Phase 4 : Organigramme décisionnel

A l'issue de la réalisation des plans d'expériences, les facteurs prépondérants sont déterminés.

L'organigramme décisionnel doit pouvoir intégrer de façon synthétique et schématique les principaux résultats de l'analyse des plans d'expériences (cf. Figure 19). Ces plans permettent d'analyser les effets principaux (éléments du bâtiment) et également[39] les effets d'interaction.

Les effets principaux donnent les priorités d'interventions. Elles devraient être indiquées pour chaque indicateur et classées en fonction de leur importance (dans nos applications, nous avons choisi de les classer par ordre décroissant, 1 représentant l'intervention prioritaire).

Les effets d'interaction peuvent être présentés par des connexions entre les facteurs.

La clarté de cet organigramme est essentielle pour détecter les couplages importants entre facteurs afin de dégager les solutions bioclimatiques correspondantes.

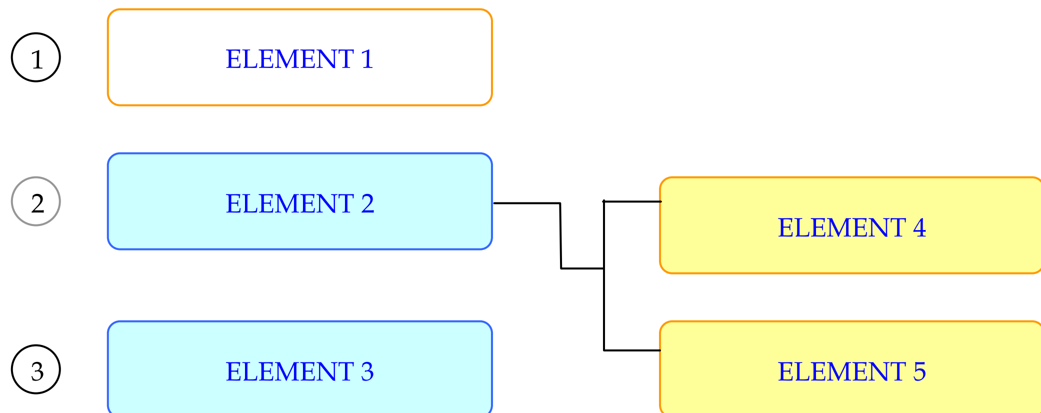


Figure 19. Exemple d'organigramme décisionnel

La figure indique que l'élément 1 est à rénover en priorité suivi des éléments 2 et 3 pour favoriser la réduction des besoins de chauffage (en bleu) et 4 et 5 pour améliorer le confort d'été (en jaune). En outre, l'élément 1 répond à la fois à la réduction des besoins de chauffage et à l'amélioration du confort d'été (blanc). Par ailleurs, même si l'élément 2 est censé ne favoriser que la réduction des besoins de chauffage, il peut améliorer le confort d'été s'il est associé aux éléments 4 et 5 (connexions).

[39] Selon le plan choisi.

4.7. Phase 5 : Solutions bioclimatiques associées aux facteurs importants : Exemple d'association des éléments aux dispositifs climatiques

Cette étape permet de dresser la liste des actions potentielles applicables au bâtiment[40]. Chaque élément du bâtiment est associé à un ou plusieurs dispositifs climatiques. Certaines solutions bioclimatiques correspondent à plusieurs éléments du bâtiment. C'est par exemple le cas de la serre qui peut concorder avec la fenêtre mais également avec le mur extérieur. De même, la ventilation nocturne est favorisée par l'ouverture des fenêtres ou encore un décloisonnement des parois internes (dernier cas non considéré dans l'étude qui va suivre).

Un exemple de solutions bioclimatiques associées aux éléments du bâtiment est illustré sur la figure suivante. Pour ces applications, l'homme d'études pourra se référer aux tableaux présentés dans la phase 2 (cf. Tableau 6).

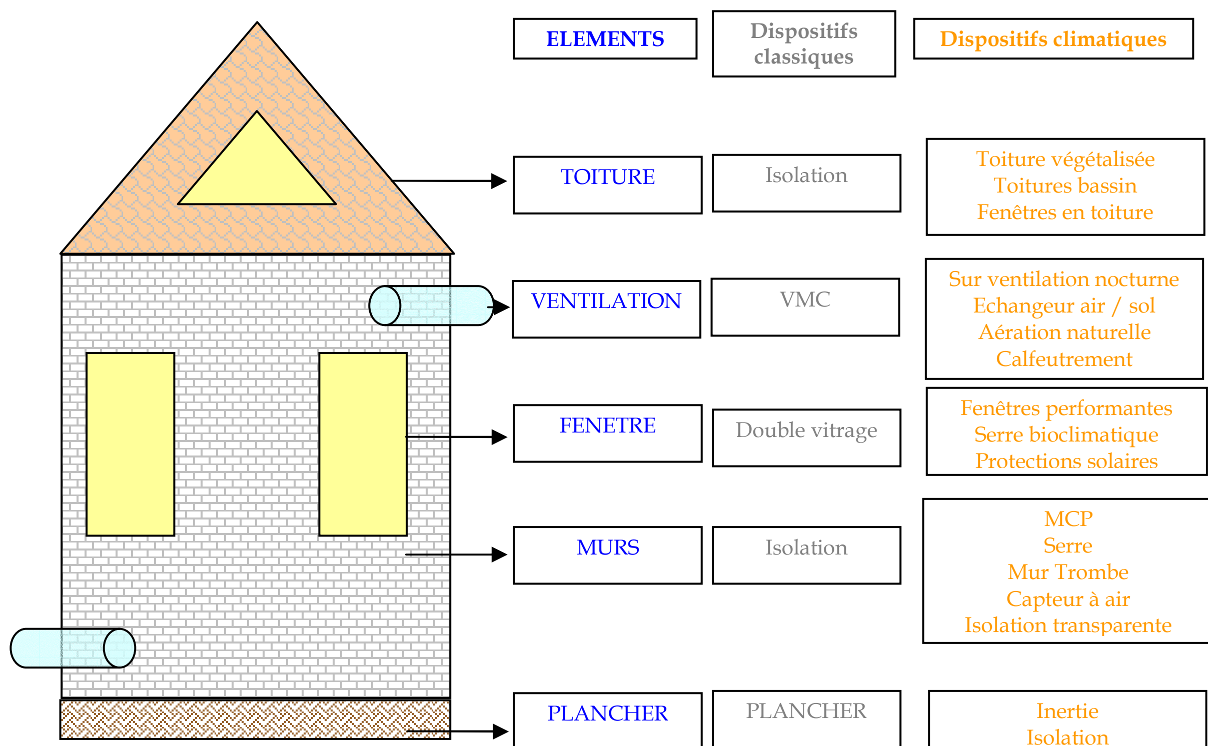


Figure 20. Association des éléments du bâtiment aux dispositifs classiques et climatiques

Il a semblé intéressant de distinguer les solutions agissant sur les éléments de l'enveloppe (fenêtres, murs, toiture, plancher, ventilation) des systèmes (éléments venant en

[40] Elle peut se situer en amont de la démarche intellectuelle de l'analyse d'aide à la décision proposée en perspectives (cf. § 8).

complément pas nécessairement connectés à l'enveloppe). Ainsi pour les cas d'application présentés dans le chapitre 7, les systèmes considérés sont les suivants : le puits canadien, la serre et le mur capteur accumulateur.

Les éléments de l'enveloppe étudiés sont : les fenêtres performantes, les protections solaires, l'isolation transparente, les matériaux à changement de phase. L'homme d'études aura loisir d'étoffer sa bibliothèque de « composants bioclimatiques » en se tenant informé des meilleures technologies disponibles.

Une méthode d'optimisation est retenue pour le dimensionnement de certaines. Elle est basée sur des critères énergétiques et est développée dans la partie suivante. L'avantage de la distinction entre solutions agissant sur l'enveloppe et système réside dans le fait que la première catégorie peut être directement optimisée.

4.8. Phase 6 : Evaluation des performances des solutions bioclimatiques par une méthode d'optimisation

Un dimensionnement simple comme celle « des règles du pouce » dans le cas d'un puits canadien (présenté en annexe) n'est généralement pas possible pour la plupart des solutions complexes (mur Trombe, serre, TIM). Plusieurs facteurs (tels que la typologie du bâtiment et la zone géographique) agissent en effet sur le choix de leur géométrie. Le dimensionnement et l'optimisation d'un système hétérogène nécessitent d'adopter une démarche globale de la conception.

4.8.1. Objectifs de la méthode d'optimisation

Selon (Regnier, 2003), dans le monde industriel, la recherche de performances, de rentabilité et de fiabilité est au cœur des processus de conception et de production des systèmes. Face à la complexité toujours croissante des dispositifs et à la nécessité d'être toujours innovant « en des temps records » pour rester compétitif, les ingénieurs se trouvent en présence de problèmes comportant de nombreux impératifs de conception. Les systèmes modernes voient interagir de plus en plus de disciplines différentes au sein d'une même application, entraînant du même coup des difficultés liées à la prise en compte des couplages pouvant exister entre ces domaines. Quand s'ajoute à ces considérations la recherche de performances particulières, tout en assurant la mission confiée au système, la conception devient quasiment impossible sans outil adapté. Lorsque la recherche de performances est abordée, nous percevons à quel point les couplages entre éléments et leur caractère pluridisciplinaire complexifient la détermination de solutions optimales. Difficile

de déterminer, par une analyse préalable, comment le dimensionnement d'un sous-système va influer sur les autres, et si les améliorations locales de certaines performances ne se font pas au détriment des autres. Dans ce contexte, un outil d'optimisation trouve une place privilégiée dans le processus de conception avec pour objectif de converger vers un optimum global.

4.8.2. Présentation de la méthode d'optimisation retenue

Il existe de nombreuses méthodes numériques d'optimisation. Une partie d'entre elles nécessitent le calcul de la dérivée en un point discret. La fonction que l'on cherche à minimiser dans cette étude (cf. § 4.8.3) ne dispose pas d'expression analytique (elle est le résultat de l'intégration des puissances appelées en chauffage et en refroidissement). L'utilisation des algorithmes de recherche directs de la solution minimisant la fonction est plus adaptée à ce type de problème (Vitte, 2007). Par ailleurs, (Wetter, 2004), en comparant plusieurs algorithmes de simulation pour minimiser les consommations énergétiques d'un bâtiment, montre que les algorithmes « Hybrid Particle Swarm » et « Hooke and Jeeves » donnent les meilleurs résultats.

La méthode géométrique déterministe (Hooke and Jeeves) est donc retenue. Elle est basée sur le principe de l'agrégation des critères partiels en une fonction coût unique. La méthode de Hooke and Jeeves est une méthode géométrique directe d'optimisation (sans calcul des dérivées des contraintes et des critères). Elle comporte deux étapes principales qui sont la recherche de la direction de descente et le déplacement dans cette direction. A partir d'un point initial ou point de référence, l'algorithme effectue une recherche exploratoire par perturbation d'un incrément +Δi d'une variable, les autres variables restant fixes. Si le coût de la fonction à optimiser est meilleur, alors cette nouvelle composante est conservée. Dans le cas contraire, la variable est perturbée en -Δi et conservée en cas d'amélioration de la fonction objectif. Si les deux incréments n'apportent aucune amélioration, la composante reste inchangée. A la fin du processus, toutes les composantes ont été perturbées une fois, et nous obtenons soit un point pour lequel la fonction coût a été améliorée, soit le point de référence lui-même. Dans ce dernier cas, le processus est réitéré avec un pas Δi plus petit (typiquement Δi /2). Dans le cas contraire, le point obtenu et le point de référence sont utilisés pour définir une nouvelle direction de recherche par extrapolation. Un déplacement peut alors être effectué le long de cette direction. Le nouveau point ainsi obtenu devient le point de référence. La procédure est en général stoppée lorsque les incréments Δi deviennent inférieurs à une précision donnée vis à vis des divers paramètres (Regnier, 2003).

4.8.3. Application de la méthode d'optimisation aux solutions bioclimatiques retenues

L'objectif est de trouver une solution X (dépendant de plusieurs paramètres tels que la longueur de la serre) assurant la minimisation de la fonction coût et soumise à des contraintes. Pour trouver un dimensionnement des systèmes répondant aux stratégies de

froid et de chaud, la fonction coût tient compte des besoins en chauffage en hiver et des besoins en refroidissement en été[41] :

$$F_{solution} = \sum_{0}^{8760} (Q_{chauffage} + Q_{refroidissement}) \quad \textbf{Équation 8}$$

Les paramètres optimisés pour les différentes solutions sont explicités dans la partie traitant des applications de la méthodologie (cf. 5)[42].

Le choix de l'incrément conditionne la valeur optimum obtenue. Cet optimum dépend également du choix de la valeur initiale des paramètres. Ainsi plusieurs valeurs initiales sont testées. De même, des valeurs d'incrément minimales sont retenues. Elles engendrent des temps de simulation plus longs, mais améliorent en revanche la précision.

Le dimensionnement d'un système peut dépendre de plusieurs paramètres. La modélisation d'une solution intègre ces différents facteurs. Ils sont à identifier au préalable par l'homme d'études qui doit également renseigner leur plage de variation. Cette étape réalisée, il dispose alors de plusieurs algorithmes d'optimisation à sa disposition. Nous en avons identifié un qui semble convenir aux problématiques de la thermique du bâtiment : c'est l'algorithme de Hooke et Jeeves.

L'optimisation peut alors s'effectuer par la réduction d'une fonction coût qui pénalise les besoins en énergie. Les paramètres retenus sont ceux qui réduisent au mieux cette fonction coût. Notons que la fonction coût aurait pu intégrer une contrainte économique par le biais d'un facteur de pondération. Dans le cadre de la méthodologie MEXPER basée sur des critères énergétiques, nous avons considéré le facteur de pondération nul (pas de considération économique).

Au niveau de la réalisation des plans d'expériences, notons que les solutions agissant sur les éléments de l'enveloppe peuvent être optimisées en amont.

4.9. Phase 7 : Comparaison des solutions bioclimatiques

La dernière étape consiste à comparer les solutions bioclimatiques identifiées. Cette comparaison s'effectue suivant les indicateurs retenus (dans l'approche retenue : besoins de chauffage en hiver et indice de confort d'été).

Cette comparaison peut être illustré par un graphique ou un tableau incluant les différentes solutions et combinaisons retenues.

C'est alors à l'homme d'études, aux vues des résultats obtenus, de sélectionner la ou les solution (s) présentant le meilleur compromis dans l'amélioration des indicateurs.

Ces différentes solutions pourront alors être proposées au décideur qui aura loisir de faire son choix.

[41] Le choix des besoins en refroidissement résulte de la difficulté à trouver un facteur de pondération entre les besoins et l'indice de confort

[42] Une précision de 1% est recherchée

4.10. Conclusions sur la présentation de la méthodologie

La rénovation des bâtiments existant est un des défis à relever actuellement. La diminution des ressources fossiles, de même que les pathologies des bâtiments malsains poussent à considérer des solutions dites durables. Comment est-il possible d'intégrer ces solutions sur un bâtiment existant ?

Des méthodologies existent. Elles sont pour la plupart basées sur des solutions dites classiques. Dans ce chapitre, nous avons proposé une méthodologie systématique permettant d'associer des dispositifs climatiques aux différents éléments du bâtiment. Ces dispositifs ont été listés de façon à aider à la réalisation d'un éventuel guide de prescription.

Les principales étapes de la méthodologie ont été présentées : description et diagnostic du bâtiment existant, réalisation des plans d'expériences permettant de dresser un organigramme décisionnel en termes de réduction des besoins en chauffage et amélioration du confort d'été (ceci dans la perspective de ne pas utiliser de climatiseur), dimensionnement de solutions par une méthode d'optimisation et enfin comparaison des différentes solutions.

Plusieurs indicateurs ont été envisagés. De façon à avoir une vue « énergétique » des performances des systèmes, les besoins en chauffage et le confort adaptif ont été retenus pour les réponses de plans d'expériences. Ces plans donnent l'influence de la variation des niveaux des éléments du bâtiment (coefficient de déperditions des fenêtres et des murs, calfeutrement, ventilation naturelle, augmentation de l'inertie, isolation de la toiture et du plancher par exemple) sur ces réponses.

Cette feuille de route donne à l'homme d'études les bases et les références bibliographiques lui permettant d'appliquer cette méthodologie. Chacune des différentes phases pourra évoluer et être complétée. Ainsi, les meilleures technologies disponibles actualisées pourraient enrichir la liste des solutions proposées. De même que le choix des plans en fonction du nombre de facteurs à considérer. D'autres réflexions sont à mener sur le nombre et le choix des indicateurs : c'est l'un des points évoqués au chapitre 7 et traités au chapitre 8.

Nous insistons sur le fait que cette analyse est un point de jonction entre la thermique du bâtiment, l'architecture mais également les mathématiques qui apportent leur plus value méthodologique.

Les différentes étapes de la méthodologie sont déclinées dans la partie suivante sur deux bâtiments de référence dont la période de construction est justifiée au préalable.

5. MISE EN ŒUVRE DE LA METHODOLOGIE

Ce chapitre consacre la mise en oeuvre de la méthodologie sur des bâtiments existants. L'introduction dresse les écueils rencontrés lors de la caractérisation du parc de logements existants en France. Ceci étant, deux bâtiments de référence antérieurs à 1975 sont sélectionnés dans des périodes de construction significatives : une maison individuelle représentative du parc de logements français ainsi que d'un logement social collectif.

Les différentes étapes de la méthodologie sont réalisables par l'utilisation d'outils spécifiques. Pour les plans d'expériences, la simulation thermique dynamique ainsi que l'optimisation, plusieurs outils sont disponibles. Nous avons dressé quelques exigences dans le chapitre précédent qui justifient le choix des outils présentés dans les lignes qui suivent.

5.1. Introduction

Une grande partie du travail de thèse a été consacrée à la caractérisation des matériaux utilisés dans le logement ancien. En effet, de façon à donner des préconisations adéquates, il est important d'effectuer un diagnostic correct. Ainsi, traditionnellement les matériaux de construction étaient recherchés dans la nature, à proximité du lieu de la construction, notamment la pierre, le sable, la terre et le bois. Tous ces matériaux sont sensibles à l'action de l'eau et des autres facteurs climatiques. Leurs caractéristiques thermo physiques évoluent donc au cours du temps. L'état actuel de la recherche apporte des informations sur le vieillissement des matériaux assez récents tels que les isolants. Cependant, pour l'application nous concernant qui consiste à une comparaison de solutions bioclimatiques, les propriétés thermo physiques des matériaux neufs sont retenues. Par la suite des hypothèses de dégradation des propriétés pourront être intégrées. Ceci étant, le caractère ancien a été intégré dans la modélisation aéraulique pour laquelle des informations étaient disponibles. C'est une première étape…

Ce constat justifie l'orientation vers une démarche méthodologique pointue et détaillée pouvant permettre à l'homme d'études de disposer d'une véritable feuille de route pour l'amener à cibler les interventions sur le bâtiment existant et la façon dont il peut associer les solutions bioclimatiques.

Les écueils de la définition d'une typologie sont maintenant présentés. La façon dont il est possible de s'en affranchir est exposée, notamment le renvoi vers une bibliographie appropriée, souvent recherchée et mal connue des bureaux d'études. Elle permet de caractériser, en tout cas de manière qualitative, un bâtiment à rénover.

Ceci étant, tous les ménages français ne sont pas logés à la même enseigne. En effet, si l'on revient aux indicateurs macroscopiques, on sait que leur consommation énergétique varie en fonction du type de logement et de sa date de construction. Comment se répartit cette consommation ? Les informations sur les consommations du parc français par période de construction (Ceren, 2004) nous éclairent. Nous avons exploité ces données brutes et les illustrons par la figure suivante :

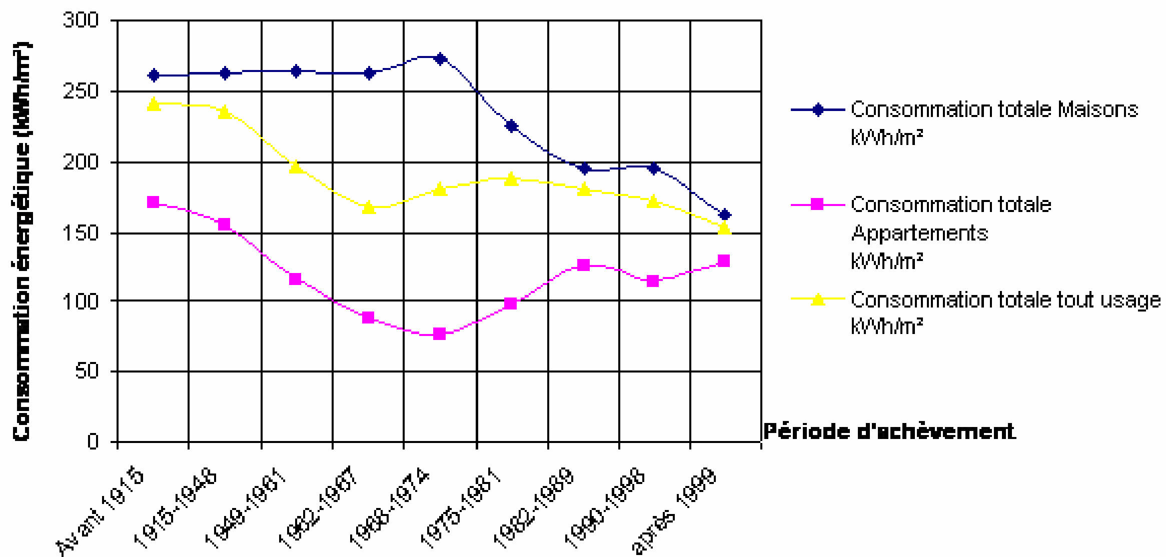


Figure 21. Consommation énergétique du parc français en fonction de la période d'achèvement

Les maisons individuelles ont une consommation énergétique plus importante que celle des appartements. Ne sont comptés que les appartements ayant le chauffage et l'eau chaude sanitaire individuels. Même si globalement la consommation tend à diminuer au fil des années, il n'empêche que cette consommation ne décroît pas linéairement avec le temps.

La consommation des maisons tend à diminuer après la première réglementation thermique. Cette diminution n'est pas perceptible pour les immeubles qui voient leur consommation augmenter de 1975 à 1999 par rapport à celle de 1974.

En analysant ces résultats, il ressort qu'il est nécessaire de distinguer la consommation des maisons individuelles de celle des appartements. En effet la période d'achèvement de bâtiments la plus « énergivore » est celle qui va de 1968 à 1974 pour les maisons tandis qu'elle se situe avant 1915 pour les appartements. Globalement, les maisons qui consomment le plus d'énergie se localisent dans la période d'achèvement allant de 1949 à 1974. Les appartements construits avant 1948 ont la consommation la plus importante.

Pour les appartements construits après 1999, peut-on parler de mauvaise performance de l'enveloppe, sachant qu'ils ont été construits après la réglementation de 1988? Serait-ce dû à une mauvaise application ou à la non application de la réglementation ? Ou encore, ne pourrait-on pas envisager que les critères de confort ayant évolué, le comportement des usagers entraîne une augmentation de la consommation ? Nous voyons poindre un problème de taille!!! : Comment dissocier de ces données la part comportementale de celle de la structure du bâtiment? Il n'empêche que ce cas (appartements construits après 1999) mis à part, les périodes d'achèvement de bâtiment pour lesquelles la consommation énergétique est la plus importante se situent avant 1975. Nous choisissons donc d'illustrer la démarche méthodologique MEXPER par des préconisations bioclimatiques pour les bâtiments datant de cette période.

5.2. Choix des logements de référence

Concernant la caractérisation du parc de logements français, rares sont les études consacrées à ce sujet. Partant de ce constat, une méthode de travail a du être formalisée : vu la difficulté de prendre en compte toutes les morphologies dans le bâti ancien et de leurs particularités régionales, nous nous sommes demandés si l'analyse des consommations régionales pourrait permettre de dégager les régions françaises les plus « énergivores », en veillant à séparer les consommations des maisons et des appartements. Dans chaque catégorie (maison individuelle ou immeuble collectif), trois régions les plus consommatrices auraient pu alors être identifiées. Pour ces régions, les carnets « Connaissance de l'habitat existant » (regroupant les principales caractéristiques des bâtiments anciens), édités par EDF, nous auraient alors donné les typologies correspondantes. De ces archétypes nous aurions donc défini nos modèles de référence.

5.2.1. Introduction

Les informations sur les consommations du parc français par période de construction des bâtiments réalisées par le CEREN (Ceren, 2004) et disponibles à EDF R&D ont pu être analysées à cet effet. Nous avons tenté de voir s'il existait une corrélation entre les consommations énergétiques et les degrés jour unifiés (DJU). Les degrés jour permettent de déterminer la quantité de chaleur consommée par un bâtiment sur une période de chauffage donnée afin de comparer des bâtiments situés dans différentes zones climatiques. Le nombre de degrés jour unifié correspond au produit du nombre de jours chauffés par la différence entre la température intérieure moyenne du local considéré (18°C) et la température extérieure moyenne limite pour le début et la fin du chauffage (15°C). Par définition, les DJU sont plus importants pour les zones froides. Regardons ce qu'il en est pour les consommations régionales des bâtiments dont nous disposons :

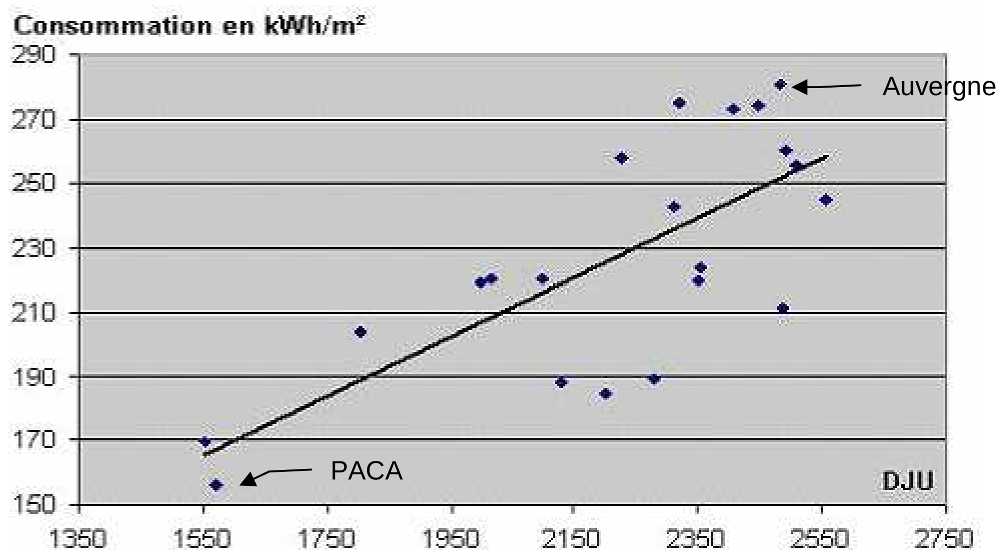


Figure 22. Corrélation entre la consommation énergétique régionale et les DJU (de l'auteur)

La Figure 22 montre que la consommation et les degrés jour unifiés ne sont pas fortement corrélés. Ces données sont donc inexploitables directement. L'analyse effectuée met en exergue le fait qu'il n'est pas possible de caractériser la vétusté d'un bâtiment par l'étude des consommations qui dépendent de paramètres fondamentaux non fournis tels que les aspects comportementaux, l'orientation des bâtiments ou encore le climat. Ceci peut s'expliquer par : la structure des bâtiments, l'orientation de ces derniers et le comportement des habitants. Il nous est donc difficile aux vues des données disponibles de faire ressortir l'importance de chacun de ces paramètres. Finalement, vu la difficulté de dégager d'une part une relation entre la consommation et la situation du bâtiment et d'autre part une typologie quantitative des bâtiments en France Métropolitaine, on choisit d'appliquer la méthodologie proposée sur deux bâtiments de référence (une maison individuelle et un logement collectif), parfaitement identifiés, rendu possible par le recensement des données qui ont permis de définir ces édifices.

5.2.2. Périodes de construction retenues

Dans son ouvrage « Réhabilitation des bâtiments existants », (Joffroy, 1999) présente trois grandes périodes de construction des logements construits avant 1974 :

- Les logements anciens
- Le logement social de l'entre deux guerres
- Le logement social des années 1950-1975.

De manière complémentaire, les informations disponibles dans (Joffroy, 1999) peuvent être complétées par celles contenues dans l'étude réalisée pour le Ministère du logement par (Graulière, 2005) qui explicite les typologies de façon qualitative. Une fois les caractéristiques globales recensées, l'homme d'étude peut se référer à l'ouvrage du (Cstb, 1980) pour renseigner les paramètres thermo physiques. Pour ces trois périodes les différents archétypes trouvés sont présentés.

5.2.2.1. Les logements anciens

Ce sont les logements construits avant la première guerre mondiale. Ils sont caractérisés par une très grande hétérogénéité due essentiellement aux savoir-faire et aux matériaux régionaux utilisés. Ces logements ont pour la plupart subi des remodelages réguliers. Comme le note (Joffroy,1999), « La réhabilitation des logements collectifs et individuels s'inscrit en effet dans un processus d'évolution continu, au cours duquel l'habitation a, depuis cent cinquante ans, enregistré un à un tous les acquis du progrès ». Cette remarque est également valable pour le travail effectué ici qui s'intègre entièrement dans ce processus ! Elle précise par ailleurs, comme Le Corbusier l'avait fait auparavant dans la Charte d'Athènes (Le Corbusier, 1957), que les formes du bâtiment ancien dépendent d'une triple syntaxe : la syntaxe constructive basée sur la portée des solives de plancher, la syntaxe de situation c'est-à-dire la compréhension de l'ordre urbain ou rural dans lequel le bâtiment s'inscrit et la syntaxe d'usage qui détermine les fonctions intégrées au bâti. Il est à noter que cette déclinaison de syntaxe se retrouve globalement dans les stratégies bioclimatiques.

(Graulière, 2005) note qu'il est possible de distinguer deux périodes : une période où les matériaux locaux sont utilisés et l'autre (fin XIXème et tournant du XXème siècle) dans

laquelle les matériaux industriels commencent à se généraliser. Elle note également ce qui caractérise ces immeubles collectifs :

-parois continues lourdes en maçonnerie de pierre et ou de briques pleines
-absence d'isolation rapportée à l'intérieur où à l'extérieur dans l'état d'origine
-planchers bas en bois sur cave ou poutrelles métalliques sur commerces ou caves
-planchers hauts lattis plâtre sous toiture ou terrasses débutantes
-des menuiseries bois à simple vitrage
-des contrevents en bois ou persiennes métalliques.

Sont distingués dans l'étude de (Graulière, 2005) plusieurs types d'immeubles collectifs dont l'immeuble de bourg, l'immeuble historique (caractérisés par des façades ornementées, généralement protégées ou faisant partie d'un ensemble sauvegardé ou d'un périmètre de protection), l'immeuble ouvrier, l'immeuble haussmannien et post-haussmannien (qui apparaît dès les années 1840 jusqu'au début du XXème siècle sur lequel l'intervention par l'extérieur est difficilement réalisable), l'immeuble éclectique (présentant également des façades ornementées, très découpées avec l'utilisation de bow-window, d'étages en retraits, de modénatures très importantes, des fenêtres de formes différentes) et l'immeuble type HBM[43] (regroupés autour de cours très découpées, favorisant ainsi l'éclairage et la ventilation naturelle à tous les étages).

(Coignet, 2005) apporte des informations complémentaires concernant la structure des matériaux utilisés durant cette période. Ces éléments sont résumés dans le Tableau 16, le Tableau 17 et le Tableau 18[44] :

Tableau 16. Caractéristiques thermo physiques des parois et des matériaux utilisés (de l'auteur)

Matériaux	ρ Densité (kg/m3)	Cp Capacité (kJ/kg.K)	λ Conductivité (W/m.K)
Enduit plâtre	1500	1	1,264
Plâtre courant (cloison légère)	800	0,8	1,264
Béton lourd	2300	0,92	6,318
Bois lourd	650	2,4	0,83
Hourdis Béton	1300	6,48	4,8
Carrelage	2300	0,7	6,137
Mortier	200	0,84	4,15
Terre cuite	1900	0,9	4,15
Bois léger	500	1,18	0,54

Tableau 17. Composition des liants traditionnels (de l'auteur)

Eléments	Matériaux utilisés	Caractéristiques
Liants traditionnels	Argile	Liant le plus ancien, qui sert à lier entre elles les ossatures en branches des parois verticales (murs) et horizontales (couvertures en terrasse) et les « étancher » en les revêtant avec des « enduits » d'argile plastique étalés à la main (construction en torchis). Technique mise en œuvre depuis le VIIe millénaire avant notre ère
	Plâtre	Il entre surtout dans la composition d'enduit intérieur et de plaque de plâtre. Connu depuis l'antiquité
	Chaux	N'est utilisée à l'origine que pour faire des badigeons, des enduits et pour stabiliser des terres et des argiles. Connue depuis presque aussi longtemps que le plâtre, elle est développée à partir du IIIe s. avant notre ère
	Ciment	Depuis la 2nde moitié du XIXe s. (découvert en 1824), les ciments ont détrôné la chaux

43 HBM : Habitations à Bon Marché (crées par la loi de Siegfried en 1894).

44 Ne sont pas considérés : les fondations et les escaliers.

Tableau 18. Caractéristiques des façades dans les logements anciens : Murs porteurs et enduits (de l'auteur)

	Situation		Composition	Caractéristiques
Murs composites	Piliers verticaux des murs en pan de bois		Ossature bois + remplissage torchis	Un des plus anciens système constructif (IIe millénaire av. JC). On retrouve des maisons de ville dans les alignements urbains tels que Rouen, Toulouse, Strasbourg, Rennes, Troyes et les communes de nombreuses régions rurales. Ces pans sont parfois dissimulés par des enduits comme en Ile de France, en Normandie et en Champagne.
	Piliers en pierres appareillées ou en briques			
Murs homogènes	Murs banchés en pisé de terre		Pisé ou béton de terre composé de terre plus ou moins argileuse mélangée à un liant qui, dans la tradition est une chaux	La pratique de la construction traditionnelle en terre stabilisée à chaux, puis au ciment à partir de la seconde moitié du XIXe s. s'est poursuivie jusqu'aux années 1920, et parfois jusqu'à la Seconde Guerre mondiale. Très largement présent dans le centre de la France et dans les régions Rhône-Alpes et Midi-Pyrénées. Il est façonné en brique de terre crue ou banché. Le mur réalisé en pisé banché a une épaisseur de 0,5m
	Murs en maçonnerie de pierres	Maçonnerie en pierre de taille	Pierres de taille	Utilisée essentiellement pour des programmes prestigieux car coûteuse. Suivant la hauteur de ses assises, le mur est dit en petit appareil (moins de 20cm), en moyen appareil (de 20 à 35cm) ou en grand appareil (plus de 35cm)
		Parements extérieurs appareillés et cœur en « fourrure»	Pierres de taille + béton de chaux ou pierres ordinaires	Programme prestigieux également. Les pierres de taille ne sont utilisées que pour les parements extérieurs. Le cœur du mur est coulé ou monté en béton de chaux ou en pierres ordinaires
		Maçonnerie ordinaire	Pierres ordinaires + mortier de chaux puis béton de chaux	Les murs porteurs de 50cm d'épaisseur sont constitués par deux rangées d'éléments. Murs les plus couramment utilisés.
	Murs en galets		Galets + bain de mortier en pisé banché	Cette construction est spécifique aux régions où les galets se trouvent en abondance et où il n'y a pas de pierres ordinaires à proximité : Sud-est (vallée de la Durance, Valensole, Crau, Bas Dauphiné), dans le Sud-Ouest (vallée de la Garonne, piémonts des Pyrénées), en Auvergne (Limagne) et dans le Lyonnais. Son usage est relativement récent : pas antérieur à la fin du XVe s. Les murs de refend sont le plus souvent en pisé ou en briques.
	Murs en briques		Argile	On distingue la brique crue et la brique cuite. Cette dernière a disparu des régions à partir de la chute de l'Empire romain, pour réapparaître dans certaines d'entre elles, au début du XIIe s., et de manière plus généralisée au XVe s.. Jusqu'au premières décennies du XXe s., la construction de briques se rencontre surtout dans les régions où la pierre est rare. Jusqu'au années 1920, l'usage de la brique crue, moulée et séchée sur le chantier, s'est maintenu dans certaines régions, notamment dans les Pyrénées. Deux types majeurs de briques sont distingués : la brique du Nord, qui s'est généralisé au cours du XIXe s. (format 6*10,5*22cm^{3}), la brique plate et de grand format dans le midi toulousain, majoritairement mise en œuvre jusqu'à la fin du XIXe s. (5*28*42^{3}).
	Murs en pierres sèches		Pierres sèches	Utilisation souvent limitée à la construction d'annexes ou de petits bâtiments ruraux isolés
Enduits[45]	Enduits extérieurs		Mortier de chaux aérienne ou hydraulique, parfois un mortier de plâtre et chaux ou de plâtre seul	L'enduit est souvent multicouche : le plus courant est formé de trois couches.
	Enduits intérieurs		Chaux, plâtre et chaux ou plâtre	Dans les pièces d'habitation, le plâtre est le plus souvent utilisé

[45] Les murs en pierres appareillées ne sont pas enduits, le parement étant dressé apparent, de même que ceux dont la disposition des éléments forment un décor ((Coignet, 2005), P.39).

5.2.2.2. Le logement de l'entre deux guerres

(Joffroy, 1999) souligne que l'habitat de l'entre-deux-guerres est un secteur globalement protégé de l'habitat social. Sauf exception, la relative stabilité des habitants l'a préservé du cycle de la dégradation et de la dévalorisation. Elle note que la réhabilitation de ces ensembles n'a donc pas été placée sous le signe de l'urgence. En revanche, l'exiguïté et le faible niveau d'équipement des logements placent les maîtres d'ouvrage face à un dilemme : soit engager des travaux importants d'actualisation, au risque de fragiliser une population qui échappe souvent aux critères de l'Aide Personnalisée au Logement (APL), soit limiter l'intervention à des éléments de confort et risquer de réduire à terme la clientèle de ce patrimoine. Moins problématique, l'aménagement des espaces collectifs apporte une amélioration objective des conditions de vie.

5.2.2.3. Le logement des années 1950-1975

L'arrivée de l'ère industrielle a amorcé un changement conséquent dans la façon d'appréhender la construction des bâtiments. Les techniques de construction se sont ainsi vues transformées notamment par l'apparition du béton armé. Les structures économiques dans lesquelles s'exercent l'acte de construire ont également été modifiées en profondeur. (Coignet, 2005) note ainsi que « entre 1950 et 1960, ces nouvelles techniques de construction apparues et développées entre la fin du XIXe siècle et les années de l'entre deux guerres acquièrent leur maturité. Même dans les petits programmes de construction, comme pour les productions de maison individuelles, le recours au calcul de structures, et l'application des techniques contemporaines, ont consacré la disparition des techniques locales et traditionnelles. On réhabilite alors rarement les bâtiments et les quartiers anciens, on les remplace. ».

Notons l'importance de cette période, elle caractérise en effet la fin d'une architecture régionalisée pour des modèles de construction homologués à diffusion nationale.

Tableau 19. Caractéristiques des parois (de l'auteur)

		Résumé descriptif	Matériau
Terrassement		Fouilles en rigoles pour fondations et en excavation pour cave et descente de garage	Non intégré
Sous-sol	Plancher (fondations)	Rigoles en béton de cailloux	Béton de cailloux
Sous-sol	Refend intérieur et façade	Parpaing plein de 0,20 d'épaisseur[46]	Parpaing plein
Sous-sol	Porte	Porte de garage chêne	Bois lourd
Planchers, sols		Dito, sans isolation thermique. Sols : carrelage grès cérame dans cuisine, salle d'eau, WC, entrée. Parquet ou linoléum dans les autres pièces (cariante : carrelage)	Hourdis béton + Carrelage
Parois verticales intérieures		Au rez-de-chaussée, refend en parpaing creux de 12cm d'épaisseur. Cloisons en carreau de plâtre	Cloison en carreau de plâtre
Façades extérieures		Dans la hauteur du RDC brique creuse de 0,2 à 0,25 d'épaisseur avec 4 à 6 rangées d'alvéoles selon la zone climatique. Chaînage : béton armé. Variante montagne : bardage des pointes de pignons en frise de sapin.	Brique pleine
Ouvertures extérieures		Menuiseries chêne. Porte d'entrée chêne. Persiennes : bâti chêne, remplissage sapin	Bois lourd
Ouvertures intérieures		Portes isoplanes en 34mm. Huisseries : sapin	Bois lourd
Toiture		Charpente sapin. Couverture : tuile vieillie, petit moule 22 au mètre carré. Variantes régionales : ardoise en tuile romane. Sous toiture isolante : laine minérale entre papier « Kraft ». gouttières et descentes en zinc. Variante montagne : saillie de toiture plus importante	Ardoise + Laine de verre

5.2.3. Conclusions sur le choix des bâtiments de référence

Pour le logement de l'entre deux guerres, très peu d'informations sont disponibles. D'autre part, ce type de construction a été limité dans le temps et par conséquent ne devrait pas constituer une part importante du parc immobilier français.

Par ailleurs, l'étude des données du CEREN (Ceren, 2004) sur la consommation du parc de logements français, a permis de mettre en exergue le fait que les maisons qui consomment le plus d'énergie se situent dans la période d'achèvement allant de 1949 à 1974. . Les appartements construits avant 1948 et après 1999 ont la consommation la plus importante. Par conséquent, l'élimination de la période de l'entre deux guerre se justifie de façon qualitative (manque de données sur la composition des logements) et quantitative (elle ne représente pas une part importante dans la consommation du parc de logements français).

La méthodologie est appliquée aux deux périodes extrêmes identifiées : sur un logement collectif de 1900 et une maison individuelle de 1966.

46 Variante pour la paroi verticale extérieure : béton banché ou pierre de pays de 0,35 d'épaisseur rejointoyée en creux

5.3. Choix des solutions bioclimatiques

Selon le bâtiment étudié, les besoins en chauffage et les indices de confort sont déterminés pour les solutions identifiées parmi les dispositifs suivants. Elles correspondent aux niveaux de rénovation allant 1 et 2 (cf. § 1.2.3 et 2.3).Nous en rappelons les principaux avantages. Leurs principes de fonctionnement ainsi que les modèles associés sont largement développés en annexe.

- Les fenêtres performantes : élément essentiel de l'approche passive des principes bioclimatiques. La fenêtre joue un rôle déterminant que ce soit au niveau de l'énergie (apports passifs) que du confort visuel.
- La serre : La serre est un espace vitré qui constitue un volume intermédiaire à climat intérieur variable. Une serre est très souvent utilisée pour le préchauffage de l'air de ventilation du bâtiment en hiver. La température basse de la serre n'est généralement pas régulée par un système de chauffage.
- Le mur capteur accumulateur : il constitue un système de captage et de stockage de la chaleur. Au niveau physique, le rayonnement solaire traversant le vitrage réchauffe la la surface de stockage dans laquelle la chaleur migre par conduction avant d'être diffusée par rayonnement vers l'intérieur de l'habitation avec un certain déphasage.
- Les dispositifs d'ombrage : L'énergie solaire pénètre dans les locaux au travers des vitres non protégées, sous diverses formes, la principale étant le rayonnement. En été, certains dispositifs empêchent la pénétration des rayons solaires indésirables. En hiver, en revanche, la nuit, le film peut retenir la chaleur à l'intérieur du bâtiment.
- Les échangeurs air / sol : ils conduisent l'air extérieur sec qui se rafraîchit au contact du sol vers des bâtiments ainsi ventilés. La température du sol étant à peu près constante (15 °C) quelle que soit la saison, l'air est rafraîchi pendant l'été est réchauffé pendant l'hiver. Cette solution n'est pas facilement praticable en centre ville et demande une mise en œuvre soignée.
- La ventilation nocturne : Il s'agit de concepts architecturaux intégrant l'environnement du bâtiment, son orientation par rapport au soleil et aux vents généraux. Ces principes fonctionnent particulièrement bien lorsque la différence de températures jour / nuit est importante.
- Les matériaux à changement de phase : ils sont souvent utilisés comme stabilisateurs de température en améliorant le stockage de la chaleur dans le bâtiment.
- Les matériaux à isolation transparents : ils ont l'avantage, par rapport aux isolants opaques qui réduisent les pertes thermiques au travers de l'enveloppe, de tirer partie de l'énergie solaire d'une part et d'occuper peu de place.

5.4. Choix des outils

La complexité du sujet a été de cerner le degré de précision que l'on souhaitait intégrer dans l'étude. En annexe, ces dispositifs ainsi que leur modélisation sont décrits. Plusieurs degrés de finesse de modélisation de ces éléments étant disponibles, il convient, dans un souci de cohérence et afin de comparer par la suite les systèmes entre eux, de trouver le bon niveau de modélisation. A cet effet, nous avons réalisé un recensement des logiciels existants utilisés en thermique du bâtiment : TRNSYS, TAS, ESP-r, IES <VE>, EnergyPlus, (Solene, Codyba et Comfie Pléiade en France). EDF a également développé des logiciels : CLIM 2000, CA-SIS. En outre, les logiciels SOLENE et CLIM2000 ont été utilisés pour la rédaction d'articles (Flory-Celini *et al*, 2005). Un pré requis apparaît implicitement pour le choix de logiciels, à savoir leur ouverture (possibilité d'ajouter et/ou de modifier aisément les modèles proposés) : critère placé en priorité pour le choix du logiciel. Les autres critères découlant des stratégies décrites ci-dessus (modélisation de l'enveloppe du bâtiment, de la ventilation naturelle, prise en compte de l'humidité, les dispositifs climatiques disponibles, etc.), mais aussi des points qui seront développés par la suite tels que la prise en compte de la qualité de l'air intérieur et l'approche économique également.

Notons que l'outil doit intégrer les couplages entre les phénomènes (réponses) étudiés. Ceci est dû aux interactions qui peuvent exister entre ces phénomènes.

Afin de modéliser thermiquement l'édifice, le logiciel TRNSYS a été (voir justifications ci-après). La ventilation, modélisée par des transferts de masse, est prise en compte par l'outil de simulation aéraulique associé à TRNSYS : TRNFLOW[47].

Pour la réalisation des plans d'expériences, le logiciel NEMROD (Nemrod, 2006) est utilisé.

Le dimensionnement des dispositifs s'effectue par le logiciel d'optimisation GenOpt (Wetter, 2004) qui, selon un critère énergétique, dimensionne les solutions pour répondre à des contraintes d'été et d'hiver.

Dans la Figure 23, les différentes étapes de la méthodologie MEXPER (cf. Figure 14) sont reprises et associées aux logiciels considérés).

Après avoir replacé la méthodologie dans le cadre de nos applications, nous allons justifier le choix de ces outils.

[47] TRNFLOW permet par ailleurs d'analyser les stratégies de ventilation naturelle prises en compte pour l'amélioration du confort d'été.

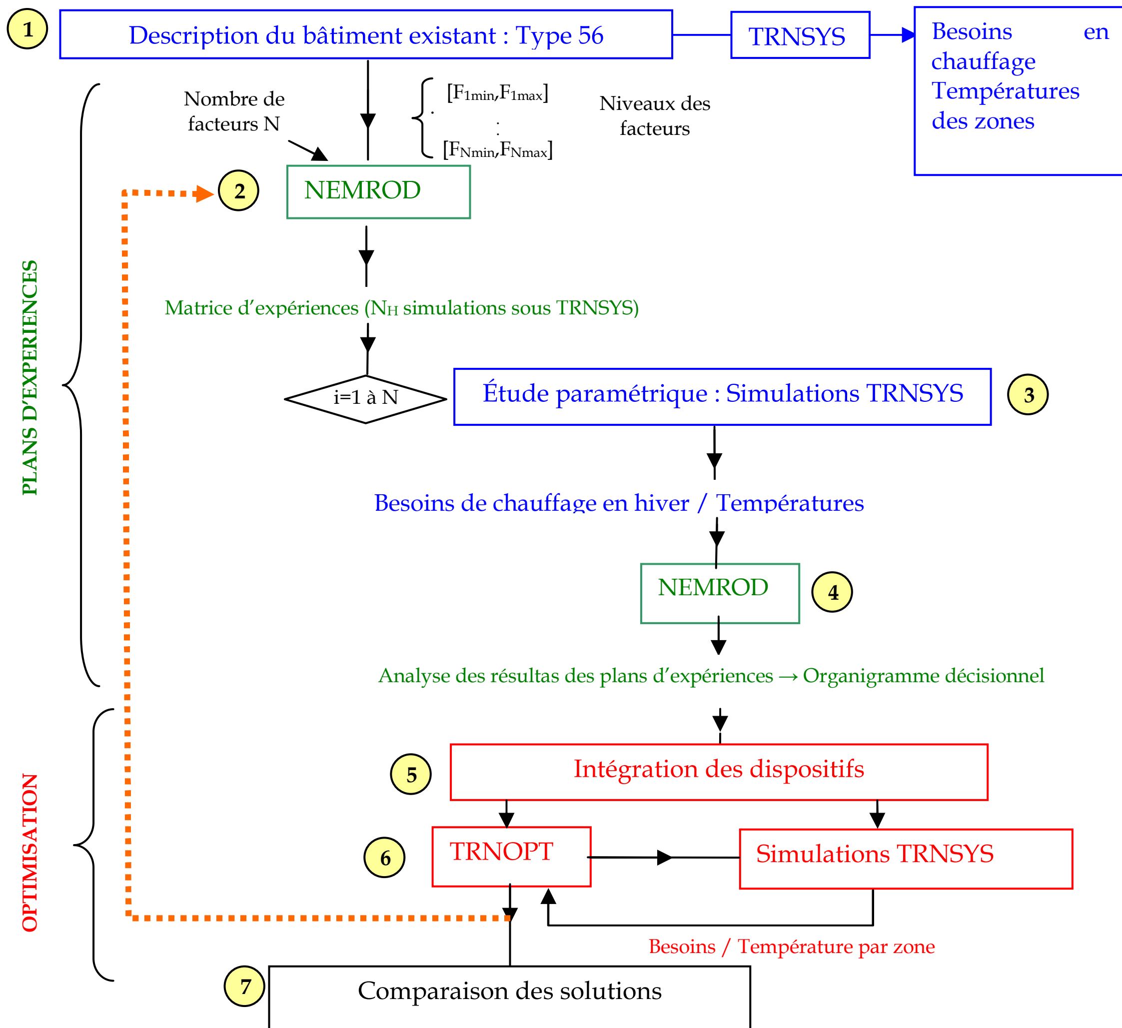


Figure 23. Méthode experte par les plans d'expériences en réhabilitation (MEXPER) en considérant les logiciels associés (de l'auteur)

5.4.1. Choix de NEMROD

Usuellement, les programmes commerciaux de mathématiques comme Matlab, Mathematica, Nemrod ou Mapple ont une fonction qui génère automatiquement les matrices d'expériences décrites dans la troisième partie. L'utilisation d'outil tel que Matlab nécessite la programmation de toutes les étapes des plans d'expériences. Nous avons opté pour le logiciel Nemrod, disponible et utilisé au CETHIL, qui a l'avantage d'être très simple d'utilisation et de proposer une bibliothèque de plans d'expériences ou encore la possibilité de renseigner les matrices d'expériences « à la main ». Nemrod est un programme écrit et distribué par Laboratoire de Prospective Réactionnelle et d'Analyse de l'Information de l'Université de Marseille. Le programme consiste principalement en un chemin obligé avec quelques choix et a l'avantage de reprendre la méthodologie décrite ci-dessus. Quatre objectifs, qui conditionnent la stratégie expérimentale, sont disponibles sous Nemrod :

- Le **criblage** (étude de nombreux facteurs) permet de connaître les poids des niveaux des facteurs sur les réponses. Ce type d'étude permet de trouver les quelques facteurs actifs, quantitatifs ou qualitatifs, parmi un grand nombre de facteurs en un nombre limité d'expériences. Le poids d'un facteur représente l'importance de la variation de la réponse due à un changement de niveau du facteur :

- dans le cas d'un facteur à 2 niveaux, l'estimation du poids représente la moitié de la variation de la réponse quand le facteur passe du niveau inférieur (-1) au niveau supérieur (+1)
- dans le cas d'un facteur de plus de deux niveaux, on obtient les estimations des poids des autres niveaux de ce facteur par rapport au niveau supérieur pris comme référence.

▪ Une **étude des effets** des facteurs est nécessaire pour connaître les effets principaux des facteurs et les effets d'interaction entre les facteurs. Une interaction étant une combinaison de facteurs n'agissant pas de façon indépendante. La figure suivante montre que l'effet du facteur B est plus important quand le facteur A est au niveau 2 que lorsqu'il est au niveau 1 :

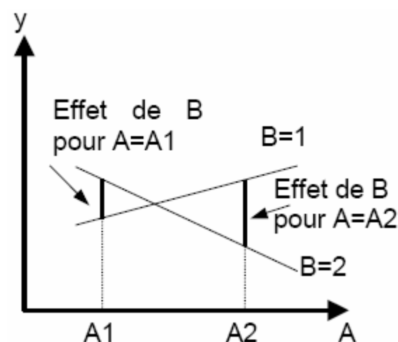


Figure 24. Représentation schématique des effets d'interaction (Filfi, 2006)

▪ La méthodologie des **surfaces de réponses** est utilisée afin de quantifier les relations entre une ou plusieurs réponses expérimentales et un groupe de facteurs. Ces derniers doivent êtres des variables quantitatives continues. L'objectif est la prédiction de la (des) réponse(s) en n'importe quel point du domaine expérimental d'intérêt. C'est typiquement le but recherché dans des études de robustesse, d'amélioration de la connaissance d'un procédé ou encore d'optimisation. Des outils de représentations graphiques ou la désirabilité facilitent la recherche de zones de compromis entre plusieurs réponses.

▪ **L'étude des mélanges** consiste à étudier une ou plusieurs réponses qui dépendent des proportions relatives des composants d'une composition. La principale caractéristique de ce type d'étude réside dans la dépendance des proportions des composants.

Nemrod donne la possibilité de générer automatiquement les matrices d'expériences classiques. Il est donc nécessaire de fixer au préalable :

▪ les facteurs à étudier (qui correspondent aux éléments du bâtiment) pouvant agir sur les besoins énergétiques et le confort

▪ les niveaux de ces facteurs. Par commodité, le niveau bas (-1) correspond à l'état initial du bâtiment à rénover et le niveau haut (+1) aux caractéristiques du label Basse Energie ou encore à l'installation d'un dispositif spécifique (dont le dimensionnement peut être optimisé).

Les plans fractionnaires complets, de Hadamard et de Rechtschaffner sont utilisés dans les applications sur les bâtiments. Une première analyse a été effectuée en considérant les plans de Hadamard avec 12 expériences pour la maison individuelle et présentée dans le cadre du congrès Clima 2007 (Flory-Celini *et al* (1), 2007). L'exploitation des résultats n'était pas commode, ceci étant certainement dû à la perte d'informations liée au nombre limité

d'expériences d'une part, et d'autre part au fait que ce type de plan ne se restreint qu'à la seule prise en compte des effets principaux des facteurs en supposant qu'il sont indépendants (ce qui ne correspond pas à la réalité des phénomènes étudiés mais permet d'estimer en première approximation les facteurs négligeables). Ces plans permettent néanmoins d'éliminer certains facteurs non significatifs sur la réponse étudiée. C'est par exemple le cas des coefficients d'absorption des murs et de l'isolation du plancher sur le logement collectif de 1900.

Une seconde famille de plans d'expériences est alors exploitée : les plans factoriels saturés ou de Rechtschaffner. Les plans de Hadamard sont utilisés en première approche pour l'étude de la maison individuelle construite après guerre et pour l'analyse des priorités de rénovation des appartements du logement du XIXème. Les plans de Rechtschaffner pour l'étude des effets d'interaction des facteurs de la maison individuelle. Les plans fractionnaires complets sont exploités pour l'étude de tous les effets d'interaction sur le logement collectif. Ainsi, les finalités de ces trois types de plans seront comparées entre elles d'une part ; d'autre part l'homme d'études peut ainsi jauger les différents niveaux d'utilisation de ces plans d'expériences (notamment la rapidité des plans de Hadamard, mais la meilleure précision et l'interprétation plus aisée des plans de Rechtschaffner et plans fractionnaires complets).

L'approche choisie pour notre étude est une approche par élément. Elle consiste à analyser les dispositifs climatiques pouvant s'intégrer sur chaque élément constitué de : la fenêtre, la toiture, les façades, la ventilation, le sol. Pour chacun des éléments, les paramètres les définissant seront cités ainsi que leur plage de variation. Les paramètres thermo physiques choisis correspondent à ceux renseignés dans TRNBUILD (descriptif du bâtiment sous le logiciel de simulation thermique dynamique TRNSYS (TRNSYS, 2004)).

5.4.2. Choix de TRNSYS

Les comparatifs de logiciels « ouverts » disponibles, concernant essentiellement les capacités à simuler facilement les performances énergétiques d'un bâtiment (c'est-à-dire en bénéficiant au maximum de la disponibilité de modèles existants) et des solutions climatiques retenues (fenêtre, serre, mur capteur accumulateur, matériaux d'isolation transparents, protections solaires, matériaux à changement de phase, échangeur air/sol, ventilation nocturne) montrent que deux environnements semblent répondre prioritairement à la problématique posée : TRNSYS et Energy Plus. Si Energy Plus présente plus de dispositifs climatiques que TRNSYS, notamment l'éclairage et la ventilation naturels, TRNSYS a l'avantage de disposer d'une interface plus agréable, d'une plus grande rapidité de prise en main, d'avoir été validé dans de nombreuses tâches de l'Agence Internationale de l'Energie et enfin d'être communément répandu dans la communauté scientifique (européenne notamment). En outre, les modèles TRNSYS de puits canadien et des matériaux à changement de phase ont pu être acquis dans le cadre de ce travail de thèse.

TRNSYS est un logiciel dédié à la simulation dynamique des systèmes, développé par le laboratoire d'énergie solaire (SEL) de l'Université de Madison aux Etats-Unis. Il permet de faire des simulations dynamiques du comportement thermique d'un bâtiment mono ou multi zones. Il permet également de suivre heure par heure les consommations (chauffage, climatisation) ou les productions (panneaux solaires) énergétiques annuelles des équipements d'un bâtiment. Ces simulations peuvent être réalisées en fonction de

l'emplacement, des matériaux de construction utilisés, de l'architecture, du concept énergétique choisi entre autre. A travers son interface graphique, l'utilisation du logiciel TRNSYS est simple. La force de TRNSYS réside dans la bibliothèque du logiciel où quelques 50 familles de composants sont disponibles, ces derniers représentant le bâtiment (mono ou multi zones), les équipements (chauffage, climatisation, ...), les données météorologiques, les régulateurs, ... il suffit de choisir les bons composants et de les relier entre eux pour réaliser une simulation permettant de modéliser l'environnement complet d'un bâtiment. Si l'utilisateur ne trouve pas de composant adéquat dans la bibliothèque, il peut également y ajouter ses propres composants.

En revanche, certains écueils ont été rencontrés notamment dans le modèle de bâtiment, le Type 56, dont l'interface est TRNBuild. Ainsi, l'intégration de parois épaisses non associées à un choix de pas de temps correct peut entraîner des erreurs de calcul sur les réponses considérées (ceci étant notamment dû au modèle de mur qui considère la transformée en Z présenté au § 6.6.1 ; en revanche la rapidité de calcul des différentes méthodes a été comparée par (Berges, 1986) dans le cas d'un mur et a montré que la méthode de la transformée en Z est très performante comparativement à la méthode des différences finies). La définition d'un nouveau type de fenêtre est aussi moins simple, puisqu'elle nécessite de rentrer dans le cœur du programme de définition des fenêtres : pour ce faire, il est nécessaire de connaître la variation de leurs caractéristiques en fonction de l'angle d'incidence.

Le comportement thermique du bâtiment est très complexe du fait des transferts thermiques se produisant simultanément et de la variation des conditions le sollicitant (conditions climatiques). TRNSYS intègre ces phénomènes dans la modélisation thermique en régime transitoire du bâtiment de la façon suivante : Les transferts thermiques au sein de l'enveloppe sont traités en utilisant le ''Type56'' de TRNSYS. Sachant qu'une paroi de bâtiment peut donner lieu à trois transferts thermiques différents : la conduction au sein de la paroi, la convection entre les faces de la paroi et les ambiances fluides qu'elle sépare, le rayonnement courtes longueurs d'ondes (CLO) et grandes longueurs d'ondes (GLO) échangé avec les autres parois ou le ciel.

La modélisation des écoulements aérauliques est effectuée par le biais de TRNFlow. Ainsi, le critère de sélection retenu pour modéliser les transferts aérauliques dans le bâtiment est la fiabilité des résultats en un minimum de temps. L'approche nodale ou zonale permet de simplifier des modèles à des fins de rapidité de calcul (Barhoun, 2006). Le bâtiment est ainsi représenté par un ensemble de nœuds représentant des pièces ou un groupement de pièces qui communiquent par des liens avec l'extérieur[48] et avec l'intérieur (échanges entre pièces). La modélisation se caractérise par la définition d'un nœud par zone. Les lois régissant les transferts aérauliques entre zones sont généralement des lois de puissance qui donnent le débit d'air en fonction de la différence de pression. Les écoulements analysés dans cette étude ont lieu entre les différentes zones du bâtiment et l'extérieur à travers les ouvertures volontaires[49] ou accidentelles[50] de l'enveloppe.

(Barhoun, 2006) note que (Feustel *et al*, 1992) ont recensé en 1992 plus de cinquante modèles utilisant l'approche nodale dans le monde, développés entre 1966 et 1989. Parmi les études menées pour valider ces modèles, il retient le travail de (Haghighat, 2003), qui a porté sur la validation de trois principaux modèles à l'aide de données expérimentales et de mesures

[48] Fissures, conduits, ouvertures ou système de ventilation mécanique.

[49] Entrée d'air, bouches d'aération, conduites de cheminée.

[50] Infiltrations d'air par les fenêtres ou portes, fissures dans les parois opaques.

sur site : COMIS (Conjuction of Multizone Infiltration Specialists), CONTAM et ESP-r, qui montre que ces modèles fournissent des résultats homogènes entre eux et cohérents avec les mesures expérimentales. Parmi les codes en pression existants, TRNFlow a été retenu, l'étude aéraulique sous TRNSYS s'effectuant avec ce logiciel connecté au modèle de bâtiment, Type 56, et est renseigné sous TRNBuild (encore appelé PREBID). Ce modèle possède comme cœur de calcul COMIS et il représente le bâtiment comme un réseau de nœuds et de liens de circulation d'air entre eux (Figure 25). Les nœuds représentent les pièces et l'environnement du bâtiment. Les liens dépeignent des ouvertures, des portes, des fissures, des joints de fenêtre et des axes aussi bien que des composants de ventilation comme des entrées d'air, des sorties, des conduits et des ventilateurs.

Les pressions de vent sur la façade et les températures de l'air d'intérieur et extérieur sont les conditions aux limites importantes. D'autre part les températures ambiantes peuvent être calculées avec un modèle thermique dynamique de bâtiment. La construction et les matériaux de l'enveloppe de bâtiment déterminent le caractère du comportement thermique (Figure 26). Dans ce cas-ci les charges internes, par exemple des personnes ou les équipements de bureau, et les écoulements d'air sont les conditions aux limites. Si les températures ambiantes et / ou les circulations d'air dans un bâtiment ne sont pas contrôlées, un modèle thermo aéraulique de bâtiment est nécessaire pour tenir compte de cette dépendance mutuelle des circulations d'air et des températures de l'air.

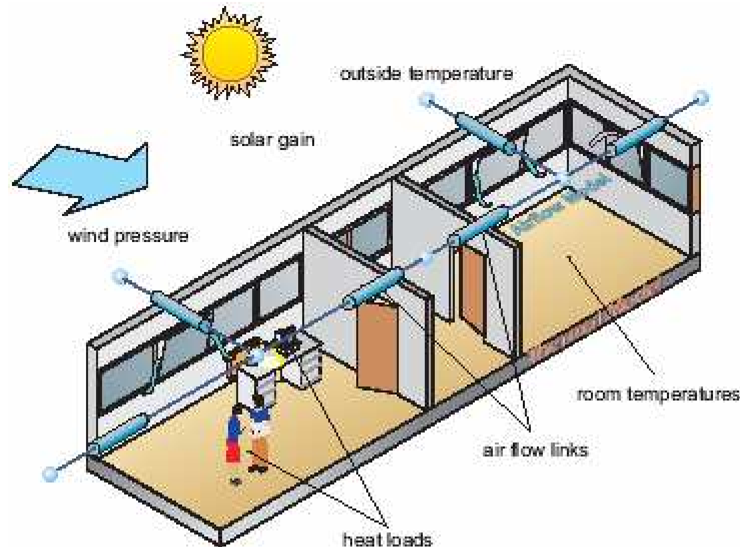


Figure 25. Modèle thermique et aéraulique d'un bâtiment de bureau naturellement aéré (Trnflow, 2006)

La maquette d'écoulement d'air est basée sur l'analogie électrique qui consiste à représenter le bâtiment par un réseau électrique de résistance où les pressions sont imposées à chaque nœud. La Figure 27 illustre un réseau de flux d'air. Les nœuds sont liés par des conductances non linéaires, modélisant les chemins d'air (les composants de circulation d'air comme des fissures, des ouvertures, des conduits, etc.). En utilisant la conservation de masse d'air dans chacune des zones, un système d'équations non linéaires est établi et résolu pour déterminer les pressions de nœud et les débits dans chaque lien.

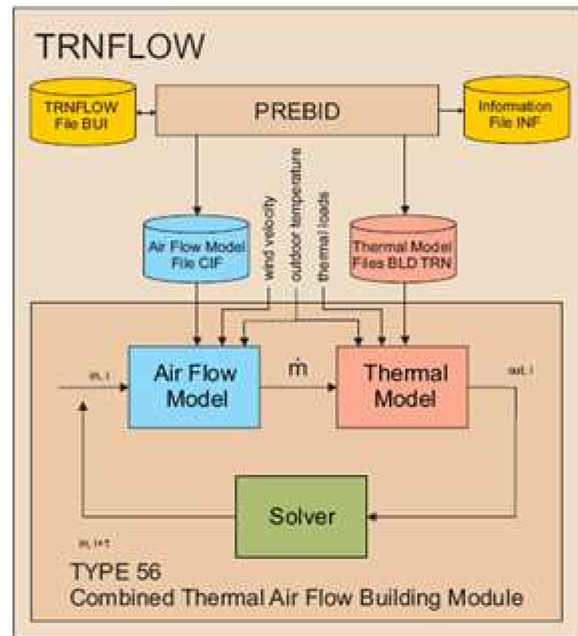


Figure 26. Écoulement de l'information du module thermo aéraulique et de l'interface utilisateur pour l'entrée de données de bâtiment (Trnflow, 2006)

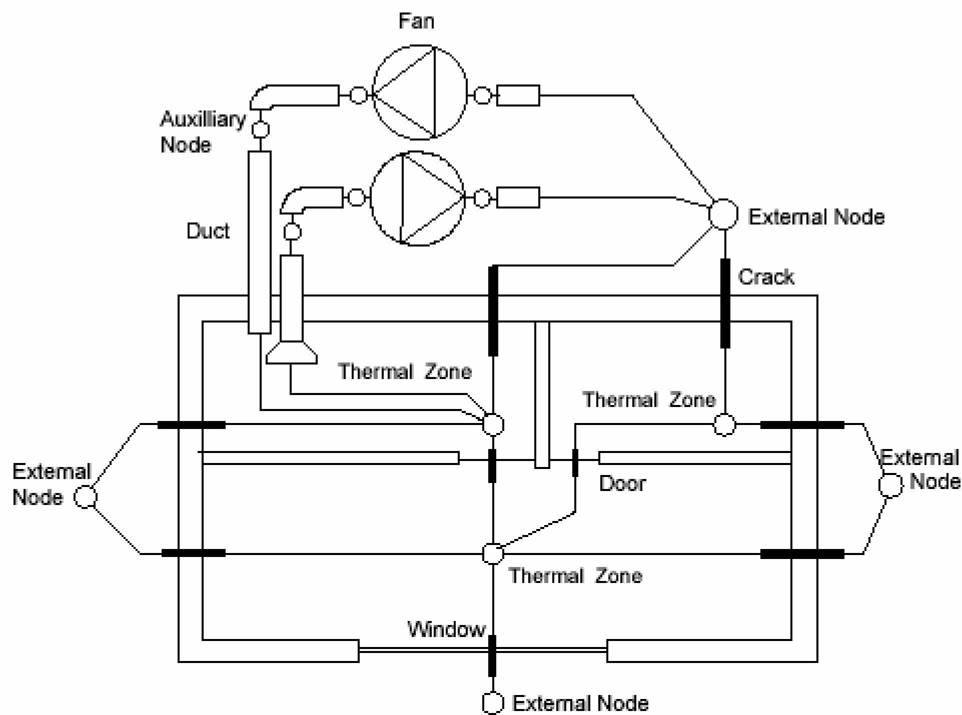


Figure 27. Modèle de réseau du bâtiment (Trnflow, 2006)

5.4.3. Choix de TRNopt

L'application de la méthode de « Hooke and Jeeves » se fait par le biais du logiciel GenOpt (Wetter, 2004). Ce logiciel d'optimisation permet de piloter a priori tout environnement de simulation ayant des entrées et des sorties écrites explicitement dans un fichier texte (EnergyPlus, DOE-2, SPARK, etc.). La société TESS (Kummert, 2007) a développé un Type, TRNOpt, permettant de coupler GenOpt à TRNSYS. Ce Type est applicable sur les systèmes disponibles dans la bibliothèque de TRNSYS et est utilisé pour le dimensionnement des dispositifs suivants[51] : mur Trombe, matériaux à isolation transparents et serre.

Comme précisé au § 4.8, le choix de l'incrément conditionne la valeur optimum obtenue. Cet optimum dépend également du choix de la valeur initiale des paramètres. Ainsi plusieurs valeurs initiales sont testées. De même, des valeurs d'incrément minimales sont retenues. Elles engendrent des temps de simulation plus longs, mais améliorent en revanche la précision. Le dimensionnement de la serre sur la maison individuelle de 1966 prend ainsi une journée de simulation. Pour chaque variation de l'incrément, il faut compter la même durée. La durée de simulation pouvant être diminuée au détriment de la précision.

5.5. Conclusions sur la mise en œuvre de la méthodologie

La mise en œuvre de la méthodologie a été décrite dans cette partie. Elle passe par le choix des bâtiments de référence. Nous en avons choisi deux, de période construction et de typologies différentes : un logement ancien (logement collectif construit en 1900) et une maison individuelle construite en 1966. Nous détaillerons les bâtis retenus dans le chapitre 7.

Sur ces derniers, le choix des solutions bioclimatiques se fait parmi les suivantes : fenêtres performantes, serre, mur capteur accumulateur, matériaux à changement de phase, matériaux à isolation transparents, échangeur air / sol, protections solaires et ventilation nocturne.

Le choix des outils a été justifié. Ainsi, ces solutions et le bâtiment sont modélisés via TRNSYS et les phénomènes aérauliques via TRNFLOW. Les plans d'expériences sont réalisés par le biais de NEMROD et l'optimisation par GenOpt (module TRNOpt sous TRNSYS).

Concernant la modélisation du bâtiment, quelques spécificités considérées dans cette étude sont indiquées dans la partie suivante.

[51] Rappelons que les matériaux à changement de phase et le puits canadien nécessitent des traitements différents. Dans le premier cas, la modélisation d'un MCP, disponible sur le marché, impose une certaine épaisseur déjà optimisée (Kuznik *et al*, 2006). Pour le puits canadien, les règles de dimensionnement de Hollmuller (Hollmuller, 2000) sont retenues.

6. HYPOTHESES DE SIMULATION UTILISEES POUR LES CAS D'ETUDES

Pour les solutions retenues et présentées en annexe (fenêtre, serre, mur capteur accumulateur, vent et ventilation naturelle, échangeur air /sol, matériaux à isolation transparents, matériaux à changement de phase), les hypothèses appliquées sont précisées ci-dessous. Elles sont suivies des spécificités liées à la modélisation des bâtiments de référence retenus : la façon dont on traite la température de sol, mais également quelques exercices qui ont été intégrés afin de tenir compte de particularités liées à l'utilisation de TRNSYS, notamment la modélisation d'une toiture inclinée ainsi que le traitement de parois épaisses par le logiciel.

La période de chauffage considérée s'étale du 1er octobre au 31 avril. Les besoins de chauffage sont évalués pour une consigne de 21°C en journée et 19°C en soirée (de 21h à 6h) en hiver et les besoins de refroidissement pour une consigne de 26°C en été.

6.1. Hypothèses concernant les solutions bioclimatiques

Pour chacune des solutions non optimisées, nous avons justifié le choix des bornes supérieures (cf. Conclusions des solutions bioclimatiques). Les principales hypothèses sont présentées et constituent la borne supérieure des plans d'expériences :

- Pour nos applications, la rénovation des fenêtres suppose qu'elles sont calfeutrées[52]. Le simple vitrage sur les bâtiments existants est remplacé par des fenêtres performantes (fenêtres composées de double vitrage peu émissif avec châssis en bois[53]). Les caractéristiques de ces vitrages sont données dans le tableau suivant :

Tableau 20. Caractéristiques du vitrage (TRNSYS, 2004)

Description	Dimensions [mm]	U [W/m².K]	g [-]	Tsol [-]	Tvis [-]
Simple vitrage	2,5	5,74	0,87	0,85	0,901
Double vitrage argon	5,7/12,7/5,7	1,42	0,708	0,596	0,786

[52] Dans TRNFLOW, les coefficients de fenêtres avec bande de calfeutrement sont renseignés.

[53] cf. Annexe A1 : Les fenêtres.

- Concernant le puits canadien, les « règles du pouce » proposées par (Holmuller, 2000) sont utilisées et présentées en annexe.

- La ventilation naturelle

Pour les fissures, la loi en débit est de la forme « Cs. ΔP^n » comme indiqué dans la partie traitant du vent et de la ventilation naturelle en annexe. Pour le coefficient de décharge entre les fenêtres et l'extérieur : le calcul interne à TRNFLOW est retenu. Les fenêtres existantes sont supposées équipées d'anciennes bandes de calfeutrement. Le coefficient d'infiltration d'air par mètre de profilé et par Pa vaut Cs = 2.10^{-4} kg/(s.m.Pa^n) et le coefficient de débit d'air n=0,6 pour une fenêtre avec ancienne bande de calfeutrement.

Une stratégie d'ouverture est définie pour chaque période pour les fenêtres donnant sur l'extérieur :

- 10 min par jour durant la saison froide (Ademe, 2005) : de 7h à 7h05min et de 18h à 18h05min
- Pour la période chaude, deux stratégies d'ouverture des fenêtres sont considérées : un cas défavorable, où les fenêtres sont fermées continuellement (bâtiment non rénové). Une ventilation nocturne pendant les heures les plus fraîches : nous avons fixer la période allant de minuit à 11h en période chaude (ceci permet de mettre en exergue l'aspect comportemental), qui correspond à la borne supérieure des plans d'expériences (cf. Tableau 40).

Les fissures dues à la présence d'une cheminée ou encore d'un système actif de chauffage sont négligées. Pour les murs en contact avec l'extérieur les caractéristiques retenues pour les fissures sont explicitées :

Tableau 21. Caractéristiques physiques des fissures

Fissures	Coefficient de perméabilité de l'air Cs	Exposant de l'écoulement d'air
Murs	$2,25*10^{-5}$ kg/(s.m.Pa^n)	0,85
Plafonds (Ashrae, 2001)	$2,6*10^{-3}$ kg/(s.m.Pa^n)	0,6

- Suite à une étude sur la comparaison des protections solaires présentée dans le cadre du congrès IBPSA 2006 (Flory-Celini *et al*, 2006), les protections solaires retenues sont des stores extérieurs. Ils présentent également l'avantage d'être facilement intégrables sur un bâtiment à rénover.

- La serre : les différents types de serre sont décrits en annexe. Dans l'application considérée, le débit, le type de vitrage ainsi que la longueur (cf. Figure A 14 en annexe) sont considérés. Une protection est installée en soirée en période froide et en journée en période chaude. L'application propose l'installation de la serre sur un balcon, cas fréquent dans le cadre d'une rénovation comme spécifié par (IEA, 1997).

- L'isolation transparente est placée à l'extérieur du bâtiment à rénover. Le choix du matériau d'isolation transparent dépend du résultat de l'optimisation et s'effectue en se basant sur l'étude de (Wong *et al*, 2007) (cf. Annexe) dont le schéma synthétique est présenté ci-dessous :

TI-Systems	TI-compound system		
	A) Polycarbonate capillary plates; B) Glass fabric and transparent glue; C) Protective cover – glass plaster; D) Dark mortar absorber		
g	45-50%	Size	1.9m x 1.1m
Λ_{TI}	0.8	Thickness	80-140mm

TI-Systems	Sealed TI-glazing		
	A) 5mm outside glazing; B) 40mm acrylic glass capillary plate filled with rare-gas; C) Gasket; D) 4mm inside low-e glazing; E) Spacer		
g	63%	Size	1.0m x 1.0m-1.2m x 2.5m
Λ_{TI}	0.8	Thickness	50mm

TI-Systems	Cast-glass elements		
	A) TIM; B) Insulating web; C) Sealing and joining rubber; D) Cast glass		
g	50-60%	Size	260-490mm wide
Λ_{TI}	0.6-2.0	Thickness	120mm

TI-Systems	Prefabricated TI-wall element		
	A) Opaque insulation; B) Front cover glazing; C) TIM; D) Back glazing as absorber; E) Metal or wood frame; F) Massive wall with or without black paint		
g	65%	Size	1.2m x 3.0m
Λ_{TI}	0.8	Thickness	80-140mm

Figure 28. Classification des isolants transparents adapté par (Wong *et al*, 2007) de (IEA, 1997)

- Quant aux matériaux à changement de phase, ils sont intégrés dans les cloisons internes légères de chacun des bâtiments. La modélisation d'un MCP, disponible sur le marché, impose une certaine épaisseur de 5mm pour chacune des 2 faces de la cloison déjà optimisée (Kuznik *et al*, 2006). Les caractéristiques sont résumées dans la figure suivante :

THERMAL MASS PANEL

Descriptive Properties		Unit	Value
Thickness		mm	5.2
Width		mm	1198
Length		mm	1198
Area weight		kg/m²	4.5
Aluminium thickness (sheet)		µm	100
Aluminium thickness (edges)		µm	75
Thermal properties	**Test Method**		
Paraffin loading	Comparative test by DSC	%	60
Melt point (paraffin)	DSC method (1°C/min)	°C	21.7
Latent heat storage capacity	DSC method (1°C/min)	kJ/kg	> 70
Total heat storage capacity (Temperature range 14°C to 30°C)	DSC method (1°C/min)	kJ/kg	> 170
Physical properties			
Aluminium sheet delamination force	Internal DuPont test method	N/cm	> 20
Conductivity solid	BS EN 12667-2001	W/(m.K)	0.18
Conductivity liquid	BS EN 12667-2001	W/(m.K)	0.14
Flash Point (paraffin)	ASTM D56	°C	148

PRODUCT DESCRIPTION

The panel is a fine mixture of ethylene based polymer (40%) designed by DuPont and paraffin wax (60%) laminated on both sides with a 100 µm aluminium sheet. The edges are closed with a 75 µm aluminium tape.

REACTION TO FIRE

Single-flame source test	EN 11925-2	Class E
Surface spread of flame test	BS 476-7	Class 1

DURABILITY

Predicted to be durable for the life-time of a building

Chemically inert with most materials

ALUMINIUM TAPE

Descriptive Properties	Unit	Value
Thickness	µm	75
Width	mm	50

Figure 29. Caractéristiques et propriétés physiques de Dupont Energain (Dupont, 2007)

- La modélisation des phénomènes d'évapotranspiration mis en jeu dans une toiture végétalisée n'a pas été réalisée dans TRNSYS dans le cadre de cette thèse bien que des travaux théoriques aient été réalisés notamment dans (Theodosiou *et al*, 2003) qui a effectué une analyse paramétrique en période estivale d'une toiture végétale (cependant le développement d'un type spécifique à TRNSYS nécessiterait un travail particulier qui pourrait constituer à lui seul une thèse). La solution retenue pour l'intégration de l'élément toiture est l'amélioration de son isolation en retenant les critères Basse Energie.

6.2. Prise en compte de l'humidité

Nombre de travaux (dont (AIVC, 1987) et (IEA, 1991) cités par (Woloszyn, 1999), P.34) montre que l'humidité à l'intérieur des bâtiments peut avoir un impact sur le confort. Une précision a également été recherchée dans la modélisation de l'humidité. A cet effet, il est à noter que nous avons considéré ce paramètre que dans la prise en compte du confort au niveau du PMV.

Le bâtiment en vieillissant voit son enveloppe se détériorer avec le temps. Apparaissent ainsi des fuites de toiture, des percements de gouttières et des canalisations, des fissures dans les façades, la dégradation de l'isolant thermique, des dégâts dus aux remontées capillaires. Ces phénomènes augmentent alors la quantité de vapeur d'eau dans l'enveloppe mais également dans le bâtiment.

L'humidité est un phénomène récurrent dans les bâtiments anciens. A l'époque, ses effets permettaient la conservation des denrées alimentaires (Schmitz-Günther, 1999). Ainsi le sol de la cave n'était pas étanche et l'humidité pouvait pénétrer ! Le plafond de la cave était conçu de façon à arriver au-dessus du niveau du sol extérieur afin d'éviter que l'humidité ne remonte au rez-de-chaussée. Des surfaces d'évaporation étaient ainsi créées par des soupiraux qui restaient constamment ouverts.

En aménageant le sous-sol en espace habitable dans le cadre d'une rénovation, généralement des enduits étanches et des fenêtres hermétiques sont utilisés : l'évaporation ne s'effectuant plus, l'humidité provoque des dégâts comme des taches sur les murs de la cave dues à une pression d'humidité latérales. Ceci illustre un des effets de l'humidité dans les édifices anciens, mais nombre d'ennuis causés par l'humidité existent dans le bâtiment (Roulet, 2004) dont : altération des propriétés des matériaux (perte d'isolation thermique, ramollissement du plâtre entre autre), création d'un climat favorable à la croissance de divers microorganismes, dont les acariens et les moisissures parfois toxiques ou allergènes (cf. Figure 30), destruction des matériaux organiques, notamment le bois, par des moisissures et des champignons, apparition d'efflorescences cristallines sur les parois et le décollement des peintures.

L'objet ici n'est pas de décrire les transferts de masse dans les milieux poreux, car en terme de simulation en thermique du bâtiment, les caractéristiques étudiées sont celles de l'air à l'intérieur d'une zone et non l'évolution des caractéristiques internes des matériaux. Il n'empêche que la prise en compte de l'humidité est un facteur nécessaire pour aboutir à des précisions correctes, ceci étant évident dans le cas de systèmes de ventilation régulés par l'humidité relative (Woloszyn, 1999).



Figure 30. Illustration des conséquences de l'humidité dans le bâtiment (Travaux, 2007)

Pour une information détaillée de la modélisation hydrique des bâtiments, le lecteur pourra se référer à (Woloszyn, 1999) et (Lucas, 2001). Seront présentés ici les deux modèles proposés par TRNSYS. Le premier modèle est un modèle capacitif et le deuxième à tampon hygroscopique. L'humidité est prise en compte au niveau de la détermination de l'indice de confort (le PMV). TRNSYS indique également les parois qui sont soumises au phénomène de condensation dans les différentes parois des zones étudiées. Le Type 56 traite de l'humidité dans la zone d'air (bilan de masse d'eau effectué). Par ailleurs les transferts de masse d'eau dans les parois ne sont pas pris en compte. En outre, seul l'effet de tampon hygroscopique des surfaces est considéré (non prise en compte du mobilier).

Les deux modèles proposés par TRNSYS dans le descriptif du bâtiment décrivent essentiellement le comportement hydrique de l'enveloppe du bâtiment. Dans l'absolu, le mobilier devrait être pris en compte. Dans le cadre de cette étude qui consiste essentiellement à l'optimisation par des dispositifs durables de l'enveloppe du bâtiment, le fait de négliger les meubles, ne portera pas atteinte à la comparaison des éléments.

Parallèlement au calcul sensible de bilan énergétique, le TYPE 56 calcule un équilibre d'humidité considérant l'évolution libre des rapports d'humidité ou humidification / déshumidification à un certain point de fonctionnement. Dans ce cas-ci, le TYPE56 calcule la charge latente.

Les deux modèles proposés par TRNSYS sont présentés. Nous allons nous intéresser plus particulièrement au modèle à tampon hygroscopique pour lequel nous avons cherché à trouver des relations simples permettant d'obtenir les coefficients des modèles. Ce dernier modèle est exploité dans les applications notamment dans les perspectives.

Le modèle capacitif consiste à considérer l'impact de l'humidité de l'air et de la surface de l'enveloppe et des meubles. Au départ, le modèle à capacité efficace était pressenti. Néanmoins, le manuel de TRNSYS ne spécifiant pas le calcul du ratio d'humidité, la difficulté résidait au choix de ce paramètre non explicitement définit.

Le modèle à tampon hygroscopique a donc été étudié. Il intègre cœur du tampon. Ce modèle suppose qu'un tampon hygroscopique fictif peut représenter l'absorption et la restitution de la vapeur par l'ensemble des matériaux solides présents dans une zone. Il sépare le stockage d'humidité à la surface et dans le cœur du tampon. Chaque tampon est défini par trois paramètres : la pente de l'isotherme de sorption du matériau, la masse du matériau et le coefficient d'échange.

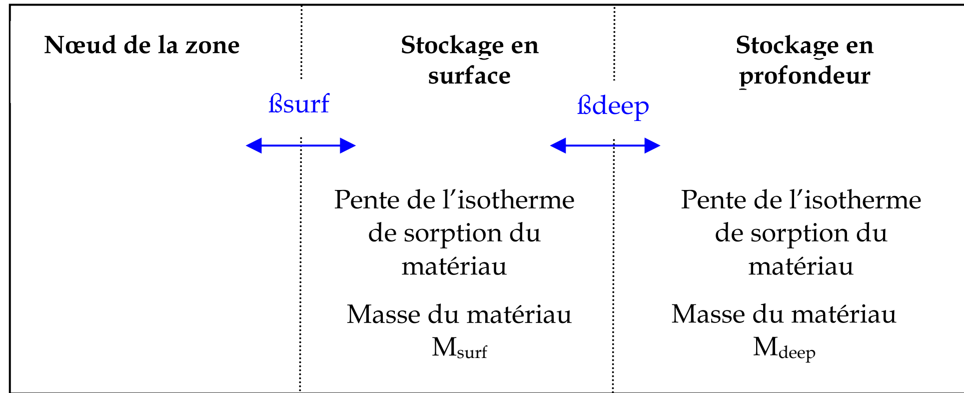


Figure 31. Modèle de tampon hygroscopique

Il présente toutefois quelques désagréments non clarifiés dans le manuel :

- Comment déterminer la profondeur de pénétration d dans le cas d'un tampon composé de plusieurs matériaux ?
- Les hypothèses retenues pour le calcul de $ß_{surf}$ et $ß_{deep}$ sont présentées pour des bureaux, ce qui ne correspond pas au cadre de notre étude.

Dans la littérature, on trouve le modèle de DUFORESTEL (Duforestel *et al*, 1994) qui est empirique et représente le comportement de l'humidité de l'air intérieur en présence de mobilier peu ou très absorbant. Cette méthode tient compte des caractéristiques internes d'une pièce et considère un tampon fictif non localisé qui représente l'impact de l'ameublement sur l'air intérieur à travers le phénomène de transfert. En cherchant des équivalences entre ce modèle et celui proposé dans le manuel de TRNSYS pour simplifier la détermination de $ß_{surf}$ et $ß_{deep}$, les paramètres sont finalement déterminés de la façon suivante :

(1) κ_{surf} et κ_{deep}

κ_{surf} est lu dans le tableau suivant et κ_{deep} est pour nos cas d'étude égal à un (plusieurs matériaux)

(2) ßsurf et ßdeep

$$\frac{\beta_{deep}}{\beta_{surf}} = \frac{\lambda_{vap}}{\eta_{vap} \cdot \alpha_{vap}} = \begin{cases} 0{,}347 & pour\ un\ matériau\ absorbant \\ 0{,}071 & pour\ un\ matériau\ peu\ absorbant \end{cases}$$

La valeur $ß_{deep}$ de TRNSYS est gardée qui permet de déduire $ß_{surf}$ selon le modèle retenu.

(3) Msurf et Mdeep :

$$M_{surf} \cdot \kappa_{surf} = M_{deep} \cdot \kappa_{deep}$$

M_{surf} est donnée par TRNSYS. Pour le calcul de d, si on considère que la surface n'est composée que d'un seul matériau, on trouve :

$$d = \frac{1}{\mu}\left(\frac{0{,}1 \cdot A}{\beta_{surf}} - 0{,}00783\right)$$

On en déduit M_{surf} puis M_{deep}.

Tableau 22. Caractéristiques des matériaux pour les modèles d'humidité sous TRNSYS

Matériau	Densité ρ [kg/m³]	$\kappa = \left[\frac{kg_{eau}}{kg_{matériau\ sec}}\right] / humidité\ relative$	Résistance de diffusion μ
Béton lourd	2200	0.04	70-150
Béton poreux	600	0.05-0.08	5-10
Brique de chaux	1900	0.03	15-25
Brique en argile	1600	0.005	5-10
Plâtre	1800	0.02	5-20
Gypse	900	0.015	8
Bois	600	0.2	40
Liège	100	0.03	5-10
Laine minérale	100	0.01	1
Mousse de polystyrène	20	0.7	20-70

6.3. Température de sol

Afin de se rapprocher au mieux de la réalité, la température du sol est modélisée par un type spécifique (Type 77) qui représente l'évolution sinusoïdale de la température sur l'année (cf. Figure 32). Une option de ce modèle est de renseigner la température moyenne de surface qui est typiquement la moyenne annuelle de la température de l'air au lieu considéré. Contrairement au fichier TMY2 (Typical Meteorological Year Files), classiquement utilisés sous TRNSYS, les fichiers Météonorm possèdent en sortie « Annual average Temperature ». Ces derniers seront donc retenus pour le calcul de la température moyenne et permettront ainsi une évaluation plus précise de la température du sol dans la zone géographique considérée.

Tableau 23. Températures moyennes annuelles obtenues avec Météonorm

Villes	Températures moyennes annuelles (°C)
Lille	10,15
Marseille	14,8

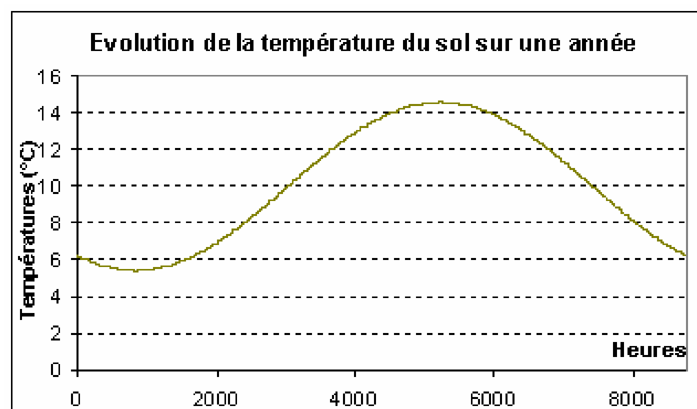


Figure 32. Température du sol pour une conductivité thermique de λ=2,42 W/m.K, une densité de 3200 kg/m³, une chaleur spécifique de 0,84 kJ/kg.K, une distance à la surface de 0,25m et une température moyenne de sol de 10°C.

6.4. Choix des coefficients convectifs

Des calculs spécifiques ont du être réalisés pour la modélisation de la maison individuelle de 1966. On peut ainsi noter notre démarche de modélisation d'une toiture inclinée sous TRNSYS et notamment l'intégration des coefficients convectifs appropriés. Les coefficients convectifs des parois internes sont calculés par le logiciel TRNSYS. Pour les autres parois verticales les valeurs par défaut sont retenues :

Tableau 24. Valeurs par défaut constantes du coefficient d'échange convectif retenues sous TRNSYS

	Extérieur	Intérieur
Parois verticales	18 W/m².K	3 W/m².K

Pour les parois inclinées, telles que la toiture, le calcul s'effectue via une entrée liée à une équation dédiée aux calculs des coefficients convectifs décrits ci-dessous. Le cours de (Brau[54], 2006) permet de calculer les coefficients convectifs extérieurs d'une paroi inclinée. On y trouve l'expression de ces coefficients en convection forcée (présence de vent) pour une plaque d'inclinaison quelconque en fonction des nombres de Nusselt, Reynolds et Prandtl en régime laminaire :

$$\overline{Nu} = \frac{\overline{h} \cdot l}{\lambda} = \frac{2}{3} \mathrm{Re}^{\frac{1}{2}} \cdot \mathrm{Pr}^{\frac{1}{3}}$$ **Équation 9**

Avec $\mathrm{Re} = \frac{\rho \cdot v_m \cdot l}{\mu}$ et $\mathrm{Pr} = \frac{\mu \cdot c_p}{\lambda}$, il vient :

$$\overline{h} = \frac{2}{3} \mu^{-\frac{1}{6}} \cdot \left(\frac{\rho \cdot v_m}{l}\right)^{\frac{1}{2}} \cdot (c_p \cdot \lambda^2)^{\frac{1}{3}}$$ **Équation 10**

Les propriétés thermo physiques de l'air étant :

ρ = 1,275 kg/m³ : Masse volumique de l'air
μ = 17,19.10⁻⁶ Pa.s : Viscosité dynamique
c_p = 1000 J/kg.°C : Chaleur spécifique
λ = 0,024 W/m.°C : Conductivité thermique.

h_e peut alors s'exprimer par la relation suivantes, l'unité étant le [W/(m².°C)]. :

$$h_e = 3{,}89 \cdot \left(\frac{v_m}{l}\right)^{\frac{1}{2}}$$ **Équation 11**

Le coefficient d'échange convectif extérieur he est donc déterminé pour chaque pièce de l'étage par la définition d'une équation sous TRNSYS dépendant de la longueur de toiture correspondante et de la vitesse de vent donnée par le fichier météo. Il est ensuite relié à une entrée créée sous le type 56. Deux longueurs de toiture sont considérées : celle des greniers L1=3,25 m (à l'extrémité de la toiture) et celle des autres pièces de l'étage L2=2,8m (se trouvant au niveau du faîte de la toiture). Le calcul du coefficient convectif intérieur pour la

[54] (Brau, 2006) Cours sur les transferts de chaleur – Département Génie civil et urbanisme : 3ème année – Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2006.

paroi inclinée (inclinaison de 45) est identique à celui proposé par TRNSYS dans le type toiture (utilisable qu'avec le type 19 monozone) et est issu de l'ASHRAE Handbook of Fundamentals. Il s'exprime : $h_{i,45}$ = 32,7 kJ/(h.m².°C) et est obtenu par interpolation linéaire.

6.5. Transferts thermiques dans TRNSYS

Pour les parois opaques, on distingue les transferts conductifs et convectifs. Dans TRNSYS, les transferts par conduction sont traités par une méthode convolutive, celle de la transformée en Z comme précisé ci-dessus et dans le § 6.6.1 (en particulier dans les Équation 19). Concernant le vitrage, les parois vitrées sont considérées sans inertie (cf. Annexes : A1. La fenêtre). De ce fait, on utilise généralement l'équation du régime permanent pour modéliser les transferts conductifs. Les échanges convectifs sont pris en compte comme suit (TRNSYS, 2004) :

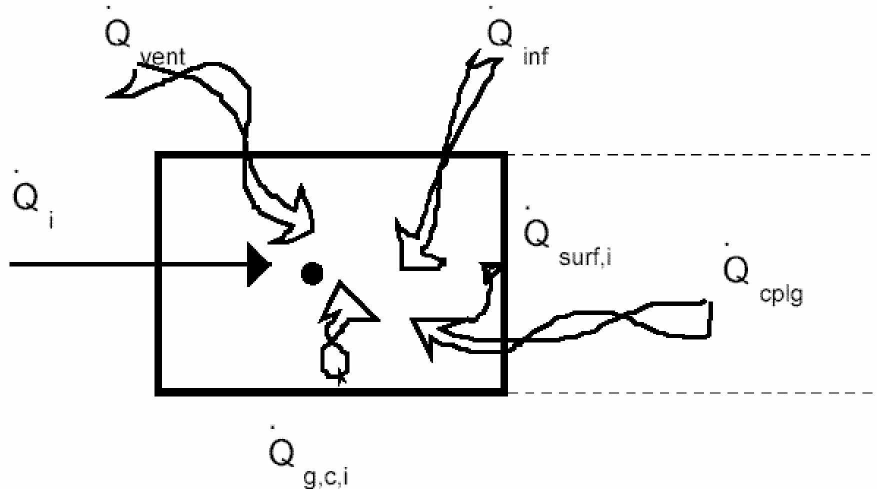


Figure 33. Bilan convectif d'un nœud d'air

$$\phi_{conv,e} = h_{c,e} \cdot (T_{Se} - T_e) \text{ et } \phi_{conv,i} = \phi_{surf,i} + \phi_{\inf,i} + \phi_{vent,i} + \phi_{g,c,i} + \phi_{cp\lg,i}$$ **Équation 12**

- Avec $\Phi_{surf,i}$, gains provenant des surfaces internes [W]

$$\phi_{surf,i} = U_{w,i} \cdot A_{w,i} \cdot (T_{wall,i} - T_{air})$$ **Équation 13**

- $\Phi_{inf,i}$, gains provenant des infiltrations [W]

$$\phi_{\inf,i} = \dot{V} \rho \cdot c_p \cdot (T_{outside} - T_{air})$$ **Équation 14**

- $\Phi_{vent,i}$, gains provenant de la ventilation [W]

$$\phi_{vent,i} = \dot{V} \rho \cdot c_p \cdot (T_{ventilation,i} - T_{air})$$ **Équation 15**

- $\Phi_{g,c,i}$, gains convectifs intérieurs [W]

Ils peuvent être dus : aux occupants, aux équipements, à l'éclairage, aux radiateurs, etc.

- $\Phi_{cplg,i}$, Gains convectifs dues aux écoulements d'air provenant de zones adjacentes [W]

$$\phi_{cp\lg,i} = \dot{V} \rho \cdot c_p \cdot (T_{zone,i} - T_{air})$$ **Équation 16**

En ce qui concerne les échanges radiatifs, TRNSYS distingue les échanges de courtes longueurs d'onde CLO correspondant à des longueurs d'onde inférieures à 2,5 µm et les grandes longueurs d'onde GLO supérieures à 2,5 µm. A l'intérieur d'une zone, on a :

$$\phi_{rdi} = \phi_{CLOi} + \phi_{GLOi} = \phi_{g,r,i} + \phi_{sol,i} + \phi_{long,i} + \phi_{gains\,\text{int}ernes,i}$$ **Équation 17**

Pour une paroi extérieure, l'équation des échanges radiatifs s'écrit comme suit :

$$\phi_{GLOe} = \sigma \cdot \varepsilon_{s,o}(T_{S,o}^4 - T_{fsky}^4) + S_{S,o}$$ **Équation 18**

Avec ϕ_{rdi} : les gains radiatifs du nœud de température de surface du mur, $\phi_{g,r,i}$: les gains radiatifs internes de la zone reçus par le mur, $\phi_{sol,i}$: les gains solaires à travers les fenêtres reçus par le mur, $\phi_{long,i}$: le flux grande longueur d'ondes échangé entre le mur et les autres murs et fenêtres, $\phi_{gains\,\text{int}ernes,i}$: si l'utilisateur spécifie un flux de chaleur à la surface du mur ou de la fenêtre et $S_{S,o}$: le rayonnement solaire absorbé par la surface.

Concernant les échanges radiatifs CLO, les flux solaires sont calculés à l'intérieur d'un processeur solaire (Type 16) à partir des données météorologiques (hauteur et azimut du soleil, densité de flux direct et diffus reçus sur un plan horizontal) qui constituent des entrées du Type 16.

6.6. L'inertie dans TRNSYS

Il est souvent reproché à TRNSYS de causer des erreurs dans le traitement des parois épaisses (parois récurrentes dans les bâtiments anciens). Nous avons cherché une astuce pour régler de manière artificielle un problème numérique. L'objectif de notre étude est l'analyse de la prise en compte des parois de forte épaisseur sous TRNSYS par la comparaison de deux bâtiments mono zones de trois mètres de hauteur pour une météo de Trappes (données météos TMY2).

Le traitement de cette partie est réalisé sous forme d'exercice. Le premier bâtiment est traité de façon « classique » en considérant des façades lourdes de 50 cm. Pour le deuxième bâtiment, l'idée est de décomposer chaque façade inerte de 50 cm en une zone virtuelle de volume négligeable composée de deux façades de 25 cm avec un fort coefficient convectif entre elles (TRNSYS étant censé ne pas avoir de problème avec les murs de cette épaisseur (25 cm)). Les échanges de chaleur au sein d'une paroi solide s'effectuant essentiellement par conduction. Il semble intéressant d'analyser au préalable la modélisation des parois opaques sous TRNSYS.

6.6.1. Modélisation des murs sous TRNSYS

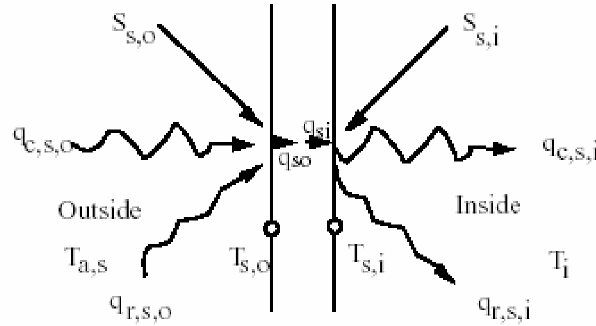


Figure 34. Flux de chaleur surfaciques et températures dans TRNSYS (TRNSYS, 2004)

La modélisation des murs est basée sur la relation de Mitalas (Mitalas, 1970) définit de surface à surface. C'est une méthode qui s'appuie sur l'analyse dynamique des échanges de chaleur, qui permet de calculer avec une bonne précision la conduction dans les murs en régime transitoire. Chaque mur est considéré comme une « boîte noire » et est défini par quatre coefficients qui reflètent son comportement thermique. Le calcul de ces coefficients intègre les propriétés de chaque couche constituant le mur. L'incrément de temps utilisé est de une heure. Quelque soit le mur, les flux de chaleur en conduction respectifs des faces interne et externe du mur s'expriment (cf. Figure 34) :

$$\dot{q}_{s,0} = \sum_{k=0}^{n_{a_s}} a_s^k \cdot T_{s,0}^k - \sum_{k=0}^{n_{b_s}} b_s^k \cdot T_{s,i}^k - \sum_{k=0}^{n_{d_s}} d_s^k \cdot \dot{q}_{s,0}^{\,k} \quad \text{et}$$
$$\dot{q}_{s,i} = \sum_{k=0}^{n_{b_s}} b_s^k \cdot T_{s,0}^k - \sum_{k=0}^{n_{c_s}} c_s^k \cdot T_{s,i}^k - \sum_{k=0}^{n_{d_s}} d_s^k \cdot \dot{q}_{s,i}^{\,k}$$

Équation 19

Ces équations de séries en temps des températures et flux de chaleur sont évaluées aux mêmes intervalles de temps. Les coefficients a^k, b^k, c^k et d^k sont des caractéristiques intrinsèques du mur. Ils rendent comptent de toutes les informations de conduction, capacité calorifique et épaisseur de chaque couche du mur.

Le coefficient k se réfère au terme dans les séries de temps. Le temps en cours est k=0, le temps suivant est k=1, etc. Le temps de base sur lequel ces calculs sont effectués est spécifié par l'utilisateur dans la description du bâtiment sous TRNBUILD. Les coefficients des séries en temps sont déterminés dans le programme TRNBUILD utilisant la transformée de transfert en z (cf. Annexe : partie sur la fenêtre §A1.5).

La méthode de la fonction de transfert de Mitalas ou facteurs de réponse peut être décrite comme la méthode dite « Histoire thermique » du mur. Le nombre de pas de temps (k) relativement au temps de base (défini par l'utilisateur) montre que pour le mur léger avec une masse thermique élevée (k ≤ 20), seul un petit pas de temps doit être considéré pour décrire le comportement de ce mur. Si le temps de base du mur considéré est plus élevé que la constante de temps, le calcul des coefficients de la matrice de fonction de transfert est interrompu. Cependant, un tel mur « fin » peu être remplacé par une résistance négligeant la masse thermique.

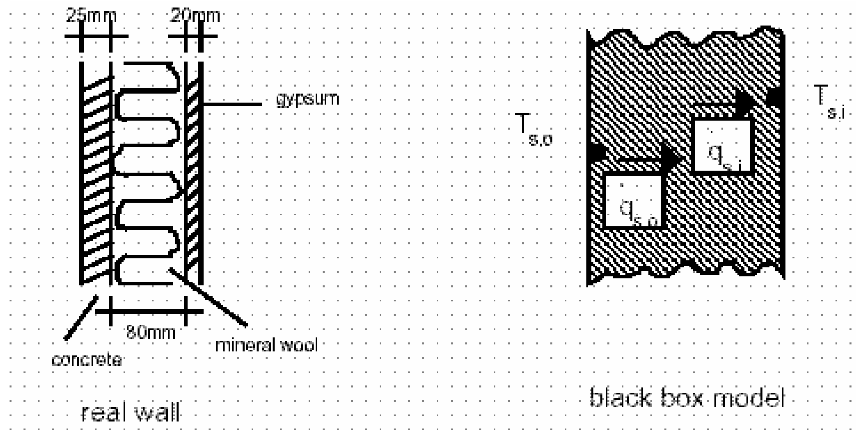


Figure 35. Exemple de modélisation d'un mur 3 couches sous TRNSYS (TRNSYS, 2004)

La figure montre un exemple de mur constitué de trois couches composées de béton, laine minérale et gypse de l'extérieur vers l'intérieur, caractérisées comme suit :

Tableau 25. Caractéristiques de matériaux utilisés dans la modélisation d'un mur 3 couches

Matériaux	Epaisseur [m]	Conductivité [kJ/h.m.K]	Capacité [kJ/kg.K]	Densité [kg/m³]
Béton	0,025	7,56	1	2400
Laine minérale	0,08	0,144	1	40
Gypse	0,02	2,52	1	1400

En utilisant la méthode de fonction de transfert, TRNBUILD calcule les coefficients de fonction de transfert. En complément de ces coefficients, le listing contient le calcul de la valeur du flux de chaleur par conduction du mur U et le coefficient de transfert de chaleur k en considérant une constante combinant les transferts de chaleur convectif et radiatif (α_i, α_0) pour les surfaces intérieur et extérieur. Ces coefficients combinant les transferts de chaleur ne sont pas utilisés durant la simulation. Pour les calculs des valeurs de k, l'expression suivante est retenue[55] :

$$\frac{1}{\alpha_i} = 0{,}13\ m^2.K/W \quad \text{et} \quad \frac{1}{\alpha_0} = 0{,}04\ m^2.K/W \qquad \textbf{Équation 20}$$

6.6.2. Cas d'étude

Dans un souci de simplification, la façade sud des bâtiments, qui comporte une fenêtre en simple vitrage, est considérée d'une épaisseur constante de 25 cm pour les deux bâtiments. Les coefficients d'échange convectif retenus pour cet exercice sont les valeurs par défaut disponibles sous TRNSYS. Dans le cas des zones virtuelles, un très fort coefficient convectif (h=2778 W/m².K) est considéré pour modéliser le contact direct.

55 Une simulation dynamique tenant compte de la masse thermique d'un élément du mur n'utilise pas ces valeurs explicitement, mais considère une résistance thermique implicite en flux de chaleur transitoire dans et hors des surfaces de mur.

Tableau 26. Valeurs par défaut constantes du coefficient d'échange convectif retenues sous TRNSYS

	Intérieur	Extérieur
Parois verticales	3 W/m².K	18 W/m².K
Parois horizontales : Flux ascendant (plafond)	3 W/m².K	18 W/m².K
Parois horizontales : Flux descendant (plancher)	3 W/m².K	276 W/m².K [56]

Le flux solaire direct (fonction *geosurf* sous TRNSYS) n'est considéré que dans la zone qui dispose de la fenêtre. Sa proportion est de 10% pour toutes les surfaces verticales, 60% pour le plancher. Il est bien sûr nul dans les zones virtuelles !

6.6.2.1. Descriptif des bâtiments

Tableau 27. Caractéristiques thermo-physiques des parois et des matériaux utilisés

Matériaux	ρ Densité (kg/m3)	Cp Capacité (kJ/kg.K)	λ Conductivité (W/m.K)
Brique	1800	1	0,88
Béton	2400	0,8	2,1
Isolant	40	0,8	0,04
Revêtement de plancher	800	1	0,07
Pierre	2000	1	1,38
Silence	80	1,44	0,05

Tableau 28. Les couches d'une paroi sont définies de l'extérieur vers l'intérieur de la zone

	Matériau	Epaisseur	U
MUR_50	Brique	50 cm	1,365 W/m².K
MUR_25	Brique	25 cm	2.216 W/m².K
MURINT_25	Brique	25 cm	2.216 W/m².K
TOITURE	Isolant	16 cm	0,233 W/m².K
	Béton	24 cm	
PLANCHER	Isolant	8 cm	0, 313 W/m².K
	Béton	24 cm	
	Silence	4 cm	
	Bois	6 cm	
	Revêtement de plancher	0,5 cm	

Pour les deux bâtiments, une fenêtre de 10m² en simple vitrage (cf. Tableau 20) est placée au Sud :

BATIMENT 1 : TRAITEMENT CLASSIQUE

Le bâtiment est considéré comme ayant toutes les façades de 50 cm d'épaisseur, hormis la façade Sud de 25cm d'épaisseur.

[56] Forte valeur du coefficient convectif modélisant un contact direct dans TRNBuild.

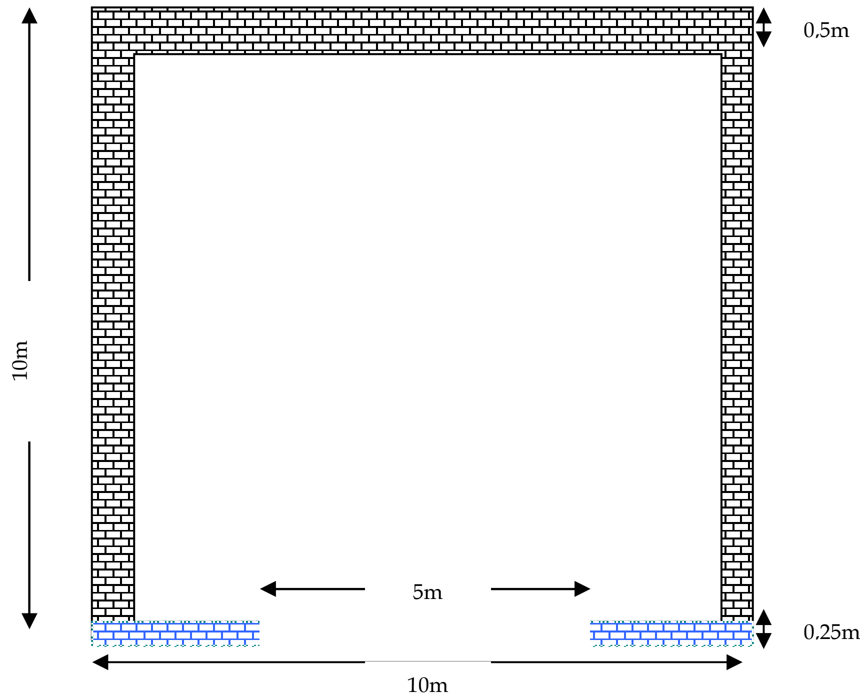


Figure 36. Descriptif du bâtiment avec parois « classiques » (vue de haut)

BATIMENT 2 : TRAITEMENT DES PAROIS A FORTS COEFFICIENTS CONVECTIFS

Chaque façade de 50cm est décomposée en 1 zone virtuelle décrite comme suit :

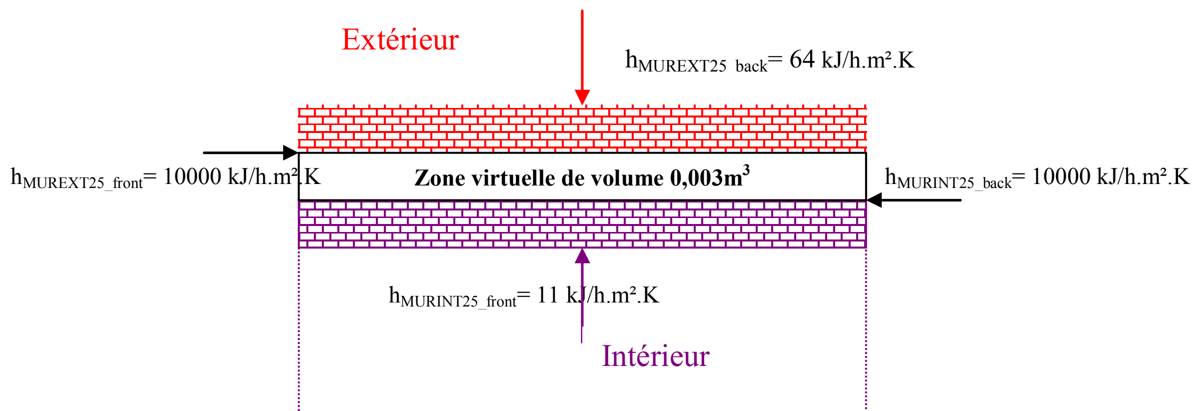


Figure 37. Descriptif de la zone virtuelle (vue de haut)

6.6.2.2. Résultats

Les besoins en chauffage sont évalués pour la période allant du 1er octobre au 31 avril pour une météo de Trappes. La température de consigne est de 20°C. En outre, on ne considère aucun gain interne et les infiltrations sont supposées nulles. Une hypothèse de sol à 12°C sur toute l'année a été retenue. Le pas de temps considéré dans la méthode à forts coefficients convectifs est de 1h dans tous les cas.

Tableau 29. Comparaison des deux méthodes pour un bâtiment non isolé

	Bâtiment classique				Bâtiment à fort coefficient convectif	Ecart entre les deux méthodes en %
Besoins sur une période de chauffe kWh	*1h (TRNBuild)*	22254.76	*1h (Isibat)*		22131.74	0,55
	2h (TRNBuild)	22172.12	*2h (Isibat)*			0,18

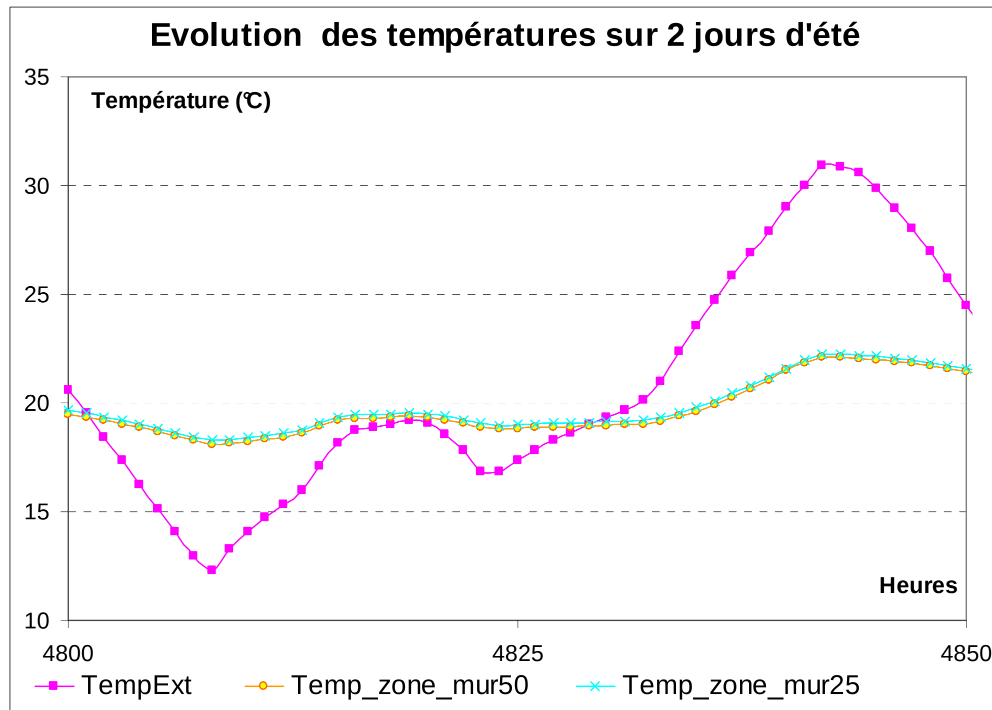


Figure 38. Evolution des températures sur deux jours d'été sur les deux bâtiments non isolés

6.6.2.3. Conclusions

La différence de températures maximum relevée entre les deux bâtiments est de 0,19°C en été. L'écart au niveau des besoins thermiques est quand à lui inférieur à 1%. Il ne semble donc pas très intéressant d'utiliser la méthode à fort coefficient convectif pour les bâtiments à forte inertie d'autant qu'elle devient fastidieuse dès lors que l'on souhaite intégrer une fenêtre dans une façade pour un problème multizones. Ces conclusions nourrissent une autre réflexion. En effet, les résultats seraient-ils si négligeables dans le cas d'ajout d'isolant, sachant qu'une des priorités en terme de rénovation est l'isolation ! Ceci pousse à considérer un autre exercice dans lequel cette fois-ci, une isolation extérieure est ajoutée sur toutes les façades verticales. Les caractéristiques thermo physiques de l'isolant étant celles décrites dans le tableau définissant les matériaux.

En ajoutant 10 ou 15cm d'isolant, une erreur apparaît sous TRNBUILD avec le bâtiment de 50cm d'épaisseur (sous-programme de TRNSYS permettant de décrire le bâtiment)) :

> *"Error creating the wall transfer function coefficients: Stability criteria not fulfilled. Check layer definition (thickness, ratio of conductivity / density). Please, check the INF-File for further information."*

La méthode à forts coefficients convectifs ne pose quant à elle aucun problème de stabilité. Néanmoins, pour la méthode classique, en changeant la base de temps (cf. Tableau 30) sous TRNBUILD, on s'affranchit des problèmes de stabilité. Cependant, il faut veiller sous TRNSYS à indiquer le même pas de temps comme spécifié dans le manuel d'utilisation de ce logiciel. Il semble en outre intéressant de relever les résultats obtenus sans tenir compte

de cette mise en garde. En ajoutant une isolation extérieure, finalement, les résultats suivants sont obtenus :

Tableau 30. Comparaison des deux méthodes pour un bâtiment isolé

	Bâtiment classique isolé par l'extérieur			Bâtiment à fort coefficient convectif isolé par l'extérieur	Ecart de besoins entre les deux méthodes en %
Besoins en kWh sur une période de chauffe pour 5 cm d'isolant	1h (TRNBuild)	15296,98	1h (Isibat)	15837,00	3,41
	2h (TRNBuild)	15727.42	2h (Isibat)		0,69
	3h (TRNBuild)	15662.02	3h (Isibat)		1,1
Besoins en kWh sur une période de chauffe pour 10 cm d'isolant	2h (TRNBuild)	14414,01	1h (Isibat)	13801.20	4,44
	2h (TRNBuild)	14347.70	2h (Isibat)		3,95
	3h (TRNBuild)	13681.25	3h (Isibat)		0,87
Besoins en kWh sur une période de chauffe pour 15 cm d'isolant	2h (TRNBuild)	13810.65	1h (Isibat)	13140.82	5,09
	2h (TRNBuild)	13745.20	2h (Isibat)		4,59
	3h (TRNBuild)	13681.25	3h (Isibat)		4,11
	4h (TRNBuild)	13406.98	4h (Isibat)		2,02
	5h (TRNBuild)	13028.79	5h (Isibat)		0,85

En augmentant le pas de temps avec l'épaisseur de la couche de mur, l'écart relevé en terme de besoins de chauffage entre la méthode « classique » et la méthode à forts coefficients convectifs diminue. Par contre, pour un mur de 55cm (50 cm de brique + 5 cm d'isolant), l'écart minimum est obtenu pour un pas de temps de 2h.

6.7. Conclusions sur les spécificités liées à la modélisation

La modélisation des bâtiments anciens nécessite l'intégration de paramètres spécifiques tels que l'humidité ou encore la prise en compte de parois épaisses. A cet effet, des études spécifiques ont été réalisées sous TRNSYS. Négliger certains phénomènes comme l'influence de l'épaisseur des matériaux agissant sur la précision des résultats, peut entraîner des erreurs de calcul et par conséquent des analyses biaisées. Pour les épaisseurs de parois mises en jeu dans le cadre des applications, un pas de temps de deux heures a été retenu.

D'autres influences mériteraient d'être intégrées comme l'évolution de la tache solaire.

D'autres considérations plus générales ont été intégrées comme les charges internes ou encore la modélisation de la toiture inclinée sous TRNSYS.

Toutes ces hypothèses sont maintenant exploitées afin de décrire au mieux les bâtiments de références dans le prochain chapitre.

7. APPLICATION DE LA METHODOLOGIE SUR LES BATIMENTS DE REFERENCES

Sur le logement collectif de 1900 et la maison individuelle de 1966, les différentes étapes de la méthodologie sont maintenant déclinées en considérant deux zones géographiques (Lille, située au Nord de la France avec un climat océanique[57] et une ville du Sud, Marseille, avec un climat méditerranéen[58]). Elles sont suivies de l'analyse des résultats des applications.

7.1. Application de la méthodologie sur un bâtiment collectif

Le logement collectif ancien correspond aux bâtiments construits avant 1914 (cf. § 5.2.2.1).

Le logement collectif est au préalable décrit. Les hypothèses retenues pour sa modélisation sont ensuite présentées, suivies de l'application des plans d'expériences. De cette étape découle les organigrammes décisionnels en terme énergétique (hiver) et de confort d'été pour Lille et Marseille.

7.1.1. Typologie d'un logement collectif des années 1900

Le logement retenu est proposé par l'Office Public d'Aménagement et de Construction (OPAC) du Grand Lyon (cf. Figure 39).

[57] Caractérisé par des hivers doux (10 °C en moyenne) et très humide marqué par des pluies intermittentes et surtout de la bruine. L'été, le temps est beaucoup plus sec mais très frais (pas plus de 23 °C en moyenne).

[58] Climat inégal sur le plan des précipitations : elles sont très fortes au printemps et en automne et peuvent engendrer des inondations; le reste de l'année, c'est le calme plat Quant aux températures, elles sont très chaudes en été (40 °C de temps en temps) et douces en hiver (16-17 °C).



Sa typologie se rapproche de celle de l'immeuble ouvrier qui est décrit par (Graulière, 2005) comme s'inscrivant dans la continuité de l'immeuble de bourg et formant le tissu ancien des villes sur la fin du XIXème siècle et début du XXèmes. Ces logements se situent généralement en zone urbaine et sont alignés et mitoyens. Le nombre de niveaux est fréquemment 5 (avec un minimum de r+3), composés de combles, de caves et avec une exploitation du rez-de-chaussée en commerce.

L'état des lieux permet de réaliser le diagnostic. Les plans, les photos et les métrés ont été fournis par l'OPAC du Grand Lyon. Des informations complémentaires ont été glanées par des entretiens avec les services techniques.

Figure 39. Photo de la façade est du logement collectif construit avant 1914 et situé à Lyon

Cet état des lieux est complété par les travaux de (Graulière, 2005) pour recenser les matériaux utilisés et par (Cstb, 1980) pour leurs caractéristiques thermo physiques. Les matériaux employés à la construction sont d'une part les matériaux locaux et aussi les premières briques pleines de fabrication industrielle généralement enduits au mortier de plâtre. Les planchers bas sont réalisés en poutres et solives bois supportant les augets, aire de plâtre et sols bas. Les planchers hauts sont en plâtre sur lattis (ensemble de lattes assemblées jointivement ou espacées).

Tableau 31. Composition des parois,[59]

Désignation	Matériau	Epaisseur [cm]	U [W/ (m².K)]
Cloison	Enduit plâtre	0,1	3,144
	Plâtre courant	5	
	Enduit plâtre	0,1	
Mur de l'escalier	Enduit plâtre	0,1	2,183
	Béton Lourd	30	
	Enduit plâtre	0,1	
Mur extérieur et mur intérieur adjacent	Enduit plâtre	0,1	2,171
	Béton Lourd	50	
	Enduit plâtre	0,1	
Porte	Bois Lourd	5	2,585
Plancher	Hourdis Béton	12	3,012
	Béton Lourd	4	
	Mortier	5	
	Carrelage	1	
Plafond	Carrelage	1	3,012
	Mortier	5	
	Béton Lourd	4	
	Hourdis Béton	12	
Toiture	Tuiles en terre cuite	1	1,795
	Bois lourd	2	
	Lame d'air		
	Bois léger	2	

59 Les couches d'une paroi étant définies de l'extérieur vers l'intérieur de la zone. Dans TRNBuild, ce qui diffère les murs intérieur et extérieur est le calcul des coefficients convectifs.

Un étage courant est retenu dans le cadre de cette étude (deuxième étage) :

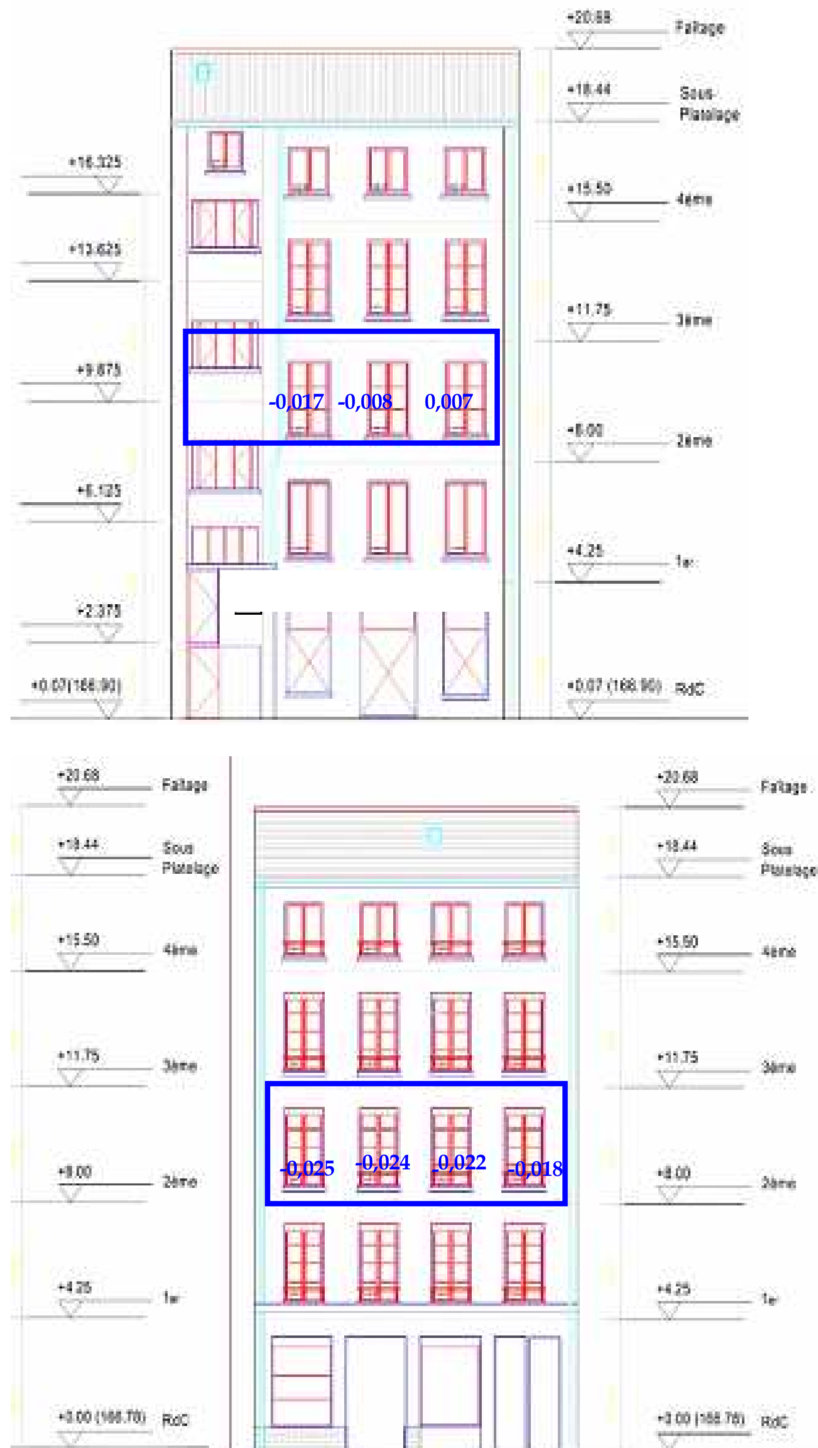


Figure 40. Façades ouest (en haut) et est (en bas) du bâtiment et coefficients cp associés (cf. § 7.1.3)

La surface chauffée est de 110m². L'appartement est modélisé en retenant les hypothèses suivantes :

7.1.2. Hypothèses de simulation

Certaines hypothèses de simulation ont été présentées au chapitre précédent. Elles sont complétées par des hypothèses spécifiques à ce bâtiment.

Le calcul des gains internes est basé sur la RT2000 (4 W/m²) en hiver et les résultats de l'étude Concerto[60] ont été retenus pour l'été (Concerto, 2006). Dans le cadre du programme Concerto, des bilans thermiques par simulation thermique du bâtiment ont été réalisés. Dans ce cadre des données issues de retours d'expériences ont été retenues pour modéliser les bâtiments. La modélisation des bâtiments de cette étude sera basée sur ces données.

- Services généraux : 0,38 W/m² et par heure (constant)
- Cuisson 8W/m² sur 3 heures : 1 heure de 12 à 13h et 2 heures de 19 à 21h
- Apports humains : 1 personne par 25m²
- Stratégie de présence : 25% entre 9 et 11h et 15 et 17h, 50% entre 12 et 14h et 100% entre 18 et 8h.

Tableau 32. Charges internes et métabolisme

Heures	Charges internes hors cuisson [W/m²]	Charges internes cuisson [W/m²]	Métabolisme [met]
de 0 à 1h	4.8	0	0,80 (Repos)
de 1 à 2h	4,4	0	0,80
de 2 à 3h	4,6	0	0,80
de 3 à 4h	4,2	0	0,80
de 4 à 5h	4,1	0	0,80
de 5 à 6h	4,3	0	0,80
de 6 à 7h	4,7	0	0,80
de 7 à 8h	5,4	1,1	1,20 (Petite activité)
de 8 à 9h	4,3	0	1,20
de 9 à 10h	4,5	0	1,00 (Assis)
de 10 à 11h	4,7	0	1,00
de 11 à 12h	5,0	0	1,00
de 12 à 13h	5,5	7,8	1,00
de 13 à 14h	5,2	0	1,20
de 14 à 15h	4,5	0	1,20
de 15 à 16h	4,3	0	1,00
de 16 à 17h	5,9	0	1,00
de 17 à 18h	6,0	0	1,00
de 18 à 19h	6,3	7,8	1,00
de 19 à 20h	6,7	7,8	1,20
de 20 à 21h	6,8	0	1,20
de 21 à 22h	6,7	0	1,20
de 22 à 23h	6,2	0	0,80
de 23 à 24h	5,4	0	0,80

Les hypothèses concernant le modèle d'humidité sont décrites dans la partie précédente (cf. § 6.2) :

60 Concerto fait partie du projet européen Renaissance vise en la réalisation de quartiers urbains exemplaires à Bracknell (Royaume-Uni), Saragosse (Espagne) et Lyon en terme d'efficacité énergétique et d'utilisation d'énergies renouvelables. Dans le cadre de ce projet, des monitorings ont été réalisé et ont données lieu aux valeurs de charges internes présentées dans le tableau.

Tableau 33. Coefficients d'humidité considérés dans les différentes zones (cf. Figure 41)

		Surface	Coeur
Zone Est1	κ	0	1
	M	1039	21
	β	4	12
Zone Est2	κ	0	1
	M	1081	22
	β	4	13
Zone Ouest	κ	0	1
	M	1251	25
	β	5	15
Escalier	κ	0	1
	M	785	16
	β	3	9

Le traitement des ponts thermiques est tiré de la réglementation thermique. Pour la liaison entre paroi extérieure et refend ou plancher intermédiaire, les valeurs « Plancher intermédiaire – mur extérieur » (Cstb, 2000) sont retenues avec un mur à isolation répartie (terre cuite). Les épaisseurs maxima disponibles sont considérées (25cm et entre 30 et 40cm). Il vient : $\psi = 0{,}7\ W/(m.K)$.

7.1.3. Découpage des zones thermiques sous TRNSYS et modélisation aéraulique

Afin de modéliser l'appartement, un zonage est effectué comme indiqué sur la Figure 41 :

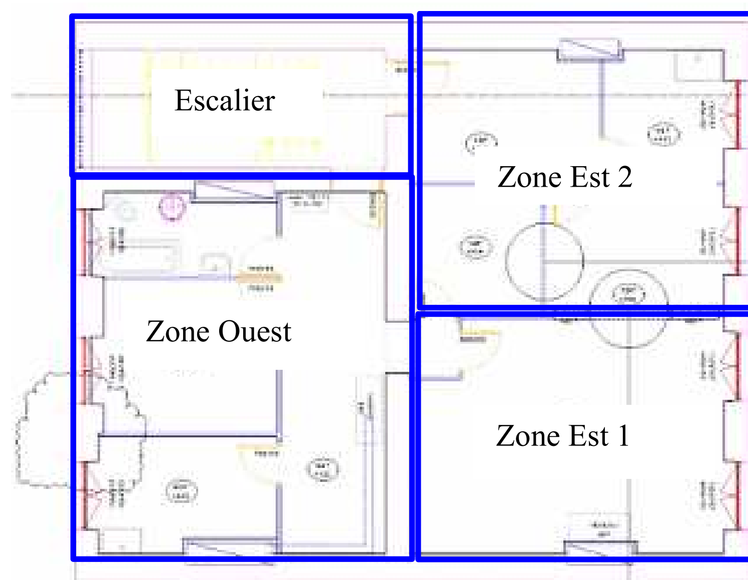


Figure 41. Plan et zonage du deuxième étage du bâtiment collectif construit avant 1914

Les hypothèses (thermiques et aérauliques) sur lesquelles sont basées les simulations sont rappelées. Seules les infiltrations parasites sont traitées. Les fenêtres sont décrites dans le Tableau 34 et les dimensions des zones sont indiquées dans Tableau 35 :

Tableau 34. Dimensions et orientations des surfaces vitrées

Appartements	Orientations	Surface [m²]	Hauteur par rapport au sol [m]
Fenêtre Est	Est	3,34	8,6
Fenêtre Ouest	Ouest	3,06	8,6

Tableau 35. Dimensions et orientations des zones

Pièces	Orientations	Surface au sol [m²]	Hauteur sous plafond [m]
Zone Est 1	Est	31	3,33
Zone Est 2	Est	34	3,33
Zone Ouest	Ouest	45	3,33
Escalier	Ouest	16	

Pour un vent dominant Nord, seuls sont considérés les transferts aérauliques dans les zones habitables. La hauteur entre le sol et le faîte de la toiture est de 20,68 m. Le bâtiment ayant plus de trois étages, le calcul des c_p s'effectue en utilisant le logiciel CpCalc+ (Grosso, 1995). Les valeurs obtenues sont indiquées sur la Figure 40. Le profil de vent retenu est le «Centre ville» avec $\alpha = 0,4$. Dans la modélisation aéraulique, des fissures au niveau des fenêtres ainsi que celles situées au niveau des murs sont considérées.

Tableau 36. Adjacence des zones et dimensions des portes (en m²)

Adjacence	Zone Est 1	Zone Est 2	Zone Ouest	Escalier
Zone Est 1		7	2*0,8 = 1,6	
Zone Est 2	7			2*0,95 = 1,9
Zone Ouest	2*0,8 = 1,6			2*0,9 = 1,8
Escalier		2*0,95 = 1,9	2*0,9 = 1,8	

7.1.4. Résultats : Diagnostic de l'existant

Afin de dresser des préconisations, il est nécessaire d'effectuer un diagnostic de l'existant. Quelles sont les pathologies du bâtiment ? Il sera alors possible de sélectionner les dispositifs pertinents. Les résultats sont obtenus pour différentes météos dans TRNSYS. Les besoins en hiver ainsi que l'indice de confort en été sont évalués et les résultats obtenus par simulation sous TRNSYS sont indiqués dans les tableaux suivants :

Tableau 37. . Besoins du logement collectif de 1900 non rénové

Besoins (kWh/m².an)	Lille	Marseille
Chauffage	105	45
Refroidissement	6	55

Tableau 38. Evaluation de l'indice de confort (cf. § 4.5.2), du 1er mai au 30 septembre, sur différentes périodes du logement collectif de 1900

	Pièces	Orientation des vitrages	Lille	Marseille
Mai	Zone_Est1	Est	12	14.1
	Zone_Est2	Est	11.7	14.3
	Zone_Ouest	Ouest	7.8	13
Juillet	Zone_Est1	Est	19.6	0
	Zone_Est2	Est	19.8	0
	Zone_Ouest	Ouest	19.8	0
Septembre	Zone_Est1	Est	0.02	11.7
	Zone_Est2	Est	0.02	11.6
	Zone_Ouest	Ouest	0.02	16
Mai à septembre	Zone_Est1	Est	17.2	14.9
	Zone_Est2	Est	17.3	14.9
	Zone_Ouest	Ouest	16.4	16

Les besoins en chauffage sont près de deux fois plus importants à Lille qu'à Marseille. Par rapport aux statistiques nationales (Ceren, 2004), qui analysent les consommations, ils sont moins élevés. Ceci peut s'expliquer par la différence fondamentale entre besoin et consommation d'une part, mais aussi par le fait que l'appartement étudié se situe au niveau d'un étage courant et présente une mitoyenneté avec deux immeubles adjacents.

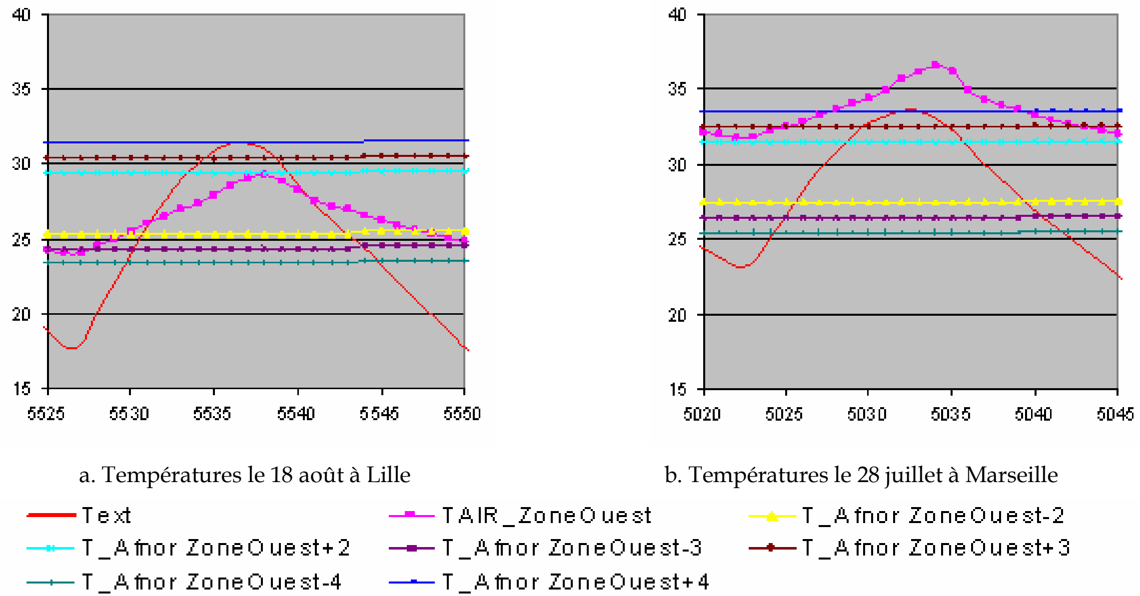
En terme de refroidissement les besoins sont très faibles à Lille tandis qu'à Marseille, ils sont supérieurs aux besoins en chauffage.

L'indice de confort d'été, qui indique la propension d'une zone à être confortable dans un bâtiment ventilé naturellement, varie selon le mois étudié et la zone géographique considérée. Globalement, pour un mois fixé, l'indice est du même ordre de grandeur selon les zones thermiques retenues. A Lille, l'indice le plus élevé (et par conséquent l'ambiance la plus confortable) est relevé en juillet, tandis qu'à Marseille c'est en mai. L'indice est fortement dégradé en septembre à Lille et en juillet à Marseille.

Pour la zone orientée Ouest, les températures pour les journées les plus chaudes à Lille et à Marseille sont indiquées sur la Figure 42. Selon la zone géographique considérée, les zones d'inconfort sont dues soient à des températures basses (cas de Lille : cf. Figure 42 a), soit à des températures hautes (cas de Marseille : cf. Figure 42 b). Il est donc nécessaire d'étudier parallèlement à l'indice proposé par la norme, les causes des indices calculés. Ainsi, autant les solutions proposées à Marseille correspondront à des dispositifs favorisant des stratégies de froid, autant à Lille, on cherchera à satisfaire une stratégie de chaud (isolation par exemple).

Le comportement en mai et septembre à Lille se rapproche donc plus de la saison froide comme montré sur la Figure 43. Plus de la moitié du mois, les températures de la zone ouest sont ont dehors des plages de confort adaptatif définit par (Afnor, 2007).

Les solutions proposées pour la période froide auront donc une incidence sur le confort en mai et septembre. Si on ne devait se baser que sur les besoins en refroidissement en été, il ne faudrait rien rénover à Lille. En revanche, en intégrant le confort, des améliorations peuvent être portées, notamment en mai et septembre. La priorité à Lille reste toutefois la réduction des besoins en chauffage. Par quel biais peut-on atteindre le facteur 4 ? L'étude du poids des éléments du bâtiment apporte des pistes de rénovation (cf. § 7.1.6).



a. Températures le 18 août à Lille

b. Températures le 28 juillet à Marseille

Figure 42. Températures relevées aux jours les plus chauds à Lille et à Marseille dans la zone ouest (T Afnor correspond à la température de confort proposée par (Afnor, 2007) et présentée au § 4.5.2.2).

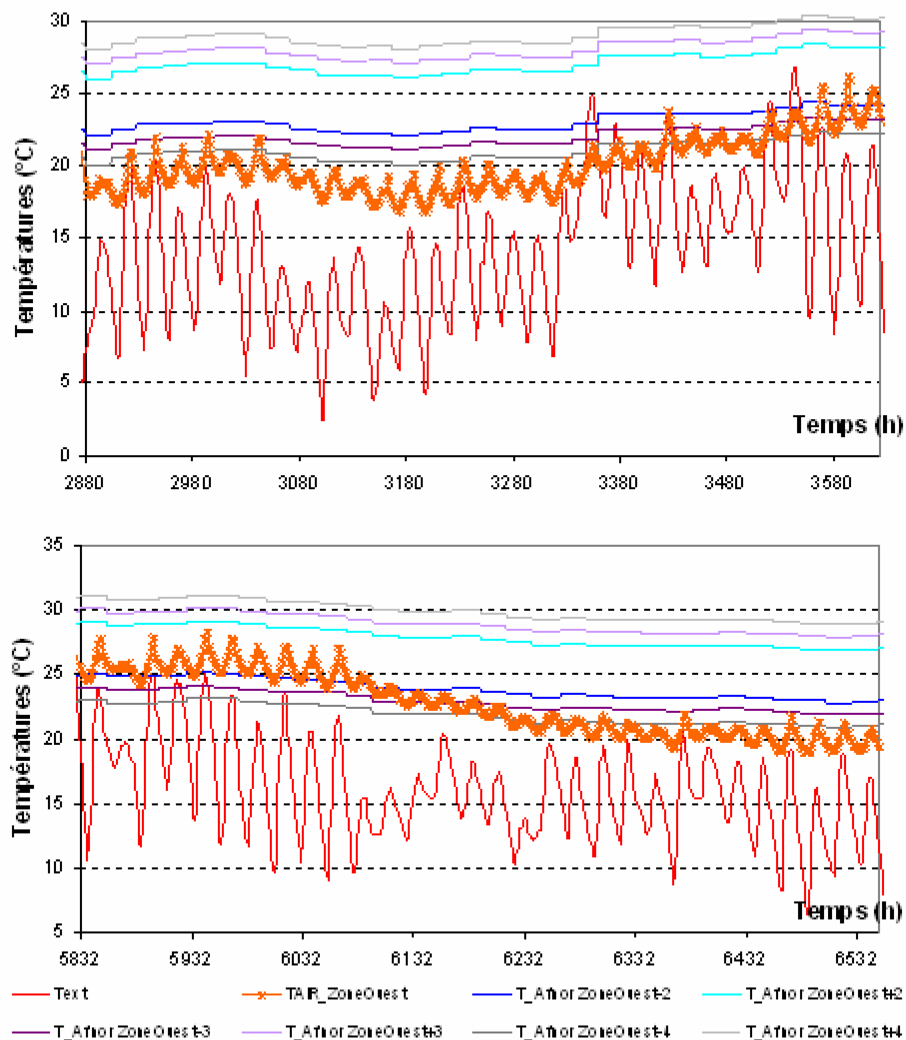


Figure 43. Températures en mai (en haut) et septembre à Lille dans la zone ouest

L'analyse experte permet d'extraire des dispositifs retenus, les « systèmes » suivants : les fenêtres performantes, les matériaux à changement de phase, les protections solaires, les matériaux à isolation transparents et la ventilation naturelle par ouverture des fenêtres. Elle permet également, vu l'étude préalable des dispositifs climatiques, d'effectuer un premier comme indiqué dans les hypothèses de simulation au § 6.

En borne supérieure des plans d'expériences, pour ce qui concerne l'isolation des murs, l'isolation transparente est installée. Son choix est effectué au préalable par la méthode d'optimisation (cf. § 4.6). Les résultats obtenus pour les deux zones géographiques sont présentés.

7.1.5. Optimisation du dimensionnement du matériau à isolation transparent sur le logement collectif

Comme précisé dans la partie traitant de cette solution, les données disponibles dans la littérature poussent à opter pour le choix du Type 35 (Fenêtre[61]). Deux paramètre sont à renseigner : le facteur solaire et la conductance thermique. Ainsi les valeurs limites suivantes sont retenues[62] :

- facteur solaire compris entre 0,45 et 0,65
- conductance thermique variant entre 0,6 et 2 W/m².K.

L'optimisation du système a été réalisée pour plusieurs valeurs initiales et plusieurs incréments, et les valeurs réduisant au mieux la fonction coût sont indiquées dans le Tableau 39.

Tableau 39. Valeurs optimisées obtenues pour le choix de TIM d'un logement collectif de 1900

	Lille	Marseille
Facteur g	0.65	0.45
U (W/m².K)	0.6	0.6
Matériau correspondant[63]	TI-Compound System	Cast-Glass Elements

Des préconisations différentes de matériaux sont donc obtenues à Lille et à Marseille. Dans les deux cas, plus faible est le coefficient de déperdition meilleure est l'isolation. En revanche, autant à Lille le facteur solaire est important autant à Marseille il est faible : ceci signifie que l'isolation devrait être plus épaisse et plus transparente à Lille tandis qu'à Marseille, elle devrait être plus épaisse mais moins transparente (voire opaque). Ces valeurs sont maintenant indiquées dans la borne supérieure des plans d'expériences.

[61] Le manuel de TRNSYS (TRNSYS, 2004) spécifie en effet que les matériaux à isolation transparents sont traités comme des fenêtres normales sous TRNSYS avec des données correspondantes.

[62] Elles sont tirées de (IEA, 1997).

[63] Ces matériaux se réfèrent au Tableau A 52 de la partie sur les dispositifs climatiques (cf. Annexes).

7.1.6. Plans d'expériences sur le logement collectif

Les plans d'expériences sont maintenant réalisés en considérant six facteurs à deux niveaux. Plusieurs plans ont été effectués[64]. Nous avons tout d'abord distingué la saison froide de la saison chaude. Pour chaque période il était nécessaire de réaliser des simulations. La différence entre les deux périodes résidait au niveau du facteur solaire des fenêtres (les valeurs des bornes étaient inversées), et également au niveau de la ventilation. Pour cette dernière un bâtiment complètement calfeutré était considéré en hiver, tandis qu'en période chaude la ventilation naturelle était retenue. Pour des raisons de commodités et de simplification des résultats d'une part et de façon à se rapprocher du comportement réel d'autre part, pour la ventilation, il a finalement été décidé de considérer le bâtiment existant en borne inférieure et un bâtiment avec des bandes de calfeutrement sur lequel est appliquée une ouverture des fenêtres de 10 minutes en hiver (Ademe (1), 2007) et la nuit en été (cf. § 6).

7.1.6.1. Etablissement de la stratégie expérimentale

Les murs extérieurs du bâtiment disposant de parois lourdes à la base (50cm de béton), les plans d'expériences se focaliseront sur l'augmentation de l'inertie des parois légères. Six facteurs sont retenus (cf. Tableau 40). Soixante quatre simulations sont réalisées pour chacune des météos et la prépondérance des facteurs est étudiée. Le plan d'expérimentation est obtenu à Lille et à Marseille en renseignant le nombre de facteurs ainsi que les niveaux correspondants :

Tableau 40. Niveaux des facteurs du logement collectif de 1900

	Facteurs	Plage de variation	
		Borne inférieure	**Borne supérieure**
Calfeutrement	U_1 : Calfeutrement	Bâtiment non calfeutré	Bâtiment calfeutré
Fenêtres	U_2 : Type de fenêtre	Simple vitrage	Double Low E Argon
	U_3 : Présence de stores	Fenêtre non protégée	Présence de store opaque (g=0,1)
Murs	U_4 : Isolation des murs	Bâtiment existant (U=2W/m².K)	Adjonction de matériau à isolation transparent (U=0,6W/m².K)
Ventilation	U_5 : Ventilation	Bâtiment existant (-1)	Ouverture de 10 min en hiver et ventilation nocturne en été (+1)
Inertie	U_6 : Inertie	Bâtiment existant (cf. Tableau 18)	Adjonction de MCP dans les cloisons légères (cf. Annexe : MCP)

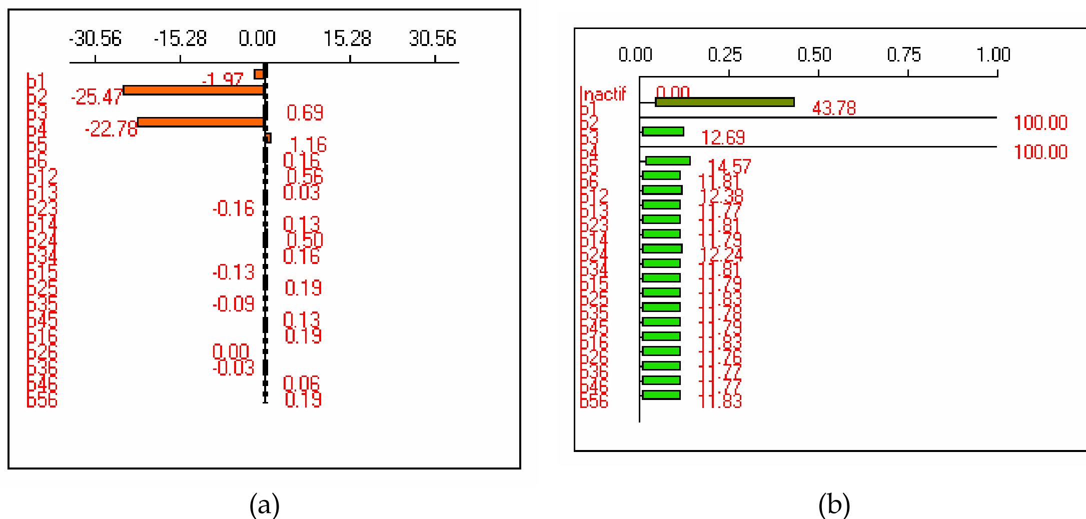
64 Plusieurs plans ont été réalisés avec différents facteurs, notamment le plancher ou encore le coefficient d'absorption. Le criblage des facteurs nous a permis de retenir les plus conséquents sur les réponses étudiées et donc de réduire le nombre d'expériences pour l'études des effets d'interaction.

Tableau 41. Plan d'expérimentation réalisé pour le logement collectif de 1900

N°Exp	Calfeutrement	Type de fenêtre	Protection	Isolation	Ventilation	Inertie
1	non calfeutré	Simple vitrage	Sans protection	Non isolé	Sans ventilation naturelle	Sans Adjonction de MCP
2	calfeutré	Simple vitrage	Sans protection	Non isolé	Sans ventilation naturelle	Sans Adjonction de MCP
3	non calfeutré	Double vitrage	Sans protection	Non isolé	Sans ventilation naturelle	Sans Adjonction de MCP
4	calfeutré	Double vitrage	Sans protection	Non isolé	Sans ventilation naturelle	Sans Adjonction de MCP
5	non calfeutré	Simple vitrage	Store opaque	Non isolé	Sans ventilation naturelle	Sans Adjonction de MCP
6	calfeutré	Simple vitrage	Store opaque	Non isolé	Sans ventilation naturelle	Sans Adjonction de MCP
7	non calfeutré	Double vitrage	Store opaque	Non isolé	Sans ventilation naturelle	Sans Adjonction de MCP
8	calfeutré	Double vitrage	Store opaque	Non isolé	Sans ventilation naturelle	Sans Adjonction de MCP
9	non calfeutré	Simple vitrage	Sans protection	Isolé	Sans ventilation naturelle	Sans Adjonction de MCP
10	calfeutré	Simple vitrage	Sans protection	Isolé	Sans ventilation naturelle	Sans Adjonction de MCP
11	non calfeutré	Double vitrage	Sans protection	Isolé	Sans ventilation naturelle	Sans Adjonction de MCP
12	calfeutré	Double vitrage	Sans protection	Isolé	Sans ventilation naturelle	Sans Adjonction de MCP
13	non calfeutré	Simple vitrage	Store opaque	Isolé	Sans ventilation naturelle	Sans Adjonction de MCP
14	calfeutré	Simple vitrage	Store opaque	Isolé	Sans ventilation naturelle	Sans Adjonction de MCP
15	non calfeutré	Double vitrage	Store opaque	Isolé	Sans ventilation naturelle	Sans Adjonction de MCP
16	calfeutré	Double vitrage	Store opaque	Isolé	Sans ventilation naturelle	Sans Adjonction de MCP
17	non calfeutré	Simple vitrage	Sans protection	Non isolé	Ventilation naturelle	Sans Adjonction de MCP
18	calfeutré	Simple vitrage	Sans protection	Non isolé	Ventilation naturelle	Sans Adjonction de MCP
19	non calfeutré	Double vitrage	Sans protection	Non isolé	Ventilation naturelle	Sans Adjonction de MCP
20	calfeutré	Double vitrage	Sans protection	Non isolé	Ventilation naturelle	Sans Adjonction de MCP
21	non calfeutré	Simple vitrage	Store opaque	Non isolé	Ventilation naturelle	Sans Adjonction de MCP
22	calfeutré	Simple vitrage	Store opaque	Non isolé	Ventilation naturelle	Sans Adjonction de MCP
23	non calfeutré	Double vitrage	Store opaque	Non isolé	Ventilation naturelle	Sans Adjonction de MCP
24	calfeutré	Double vitrage	Store opaque	Non isolé	Ventilation naturelle	Sans Adjonction de MCP
25	non calfeutré	Simple vitrage	Sans protection	Isolé	Ventilation naturelle	Sans Adjonction de MCP
26	calfeutré	Simple vitrage	Sans protection	Isolé	Ventilation naturelle	Sans Adjonction de MCP
27	non calfeutré	Double vitrage	Sans protection	Isolé	Ventilation naturelle	Sans Adjonction de MCP
28	calfeutré	Double vitrage	Sans protection	Isolé	Ventilation naturelle	Sans Adjonction de MCP
29	non calfeutré	Simple vitrage	Store opaque	Isolé	Ventilation naturelle	Sans Adjonction de MCP
30	calfeutré	Simple vitrage	Store opaque	Isolé	Ventilation naturelle	Sans Adjonction de MCP
31	non calfeutré	Double vitrage	Store opaque	Isolé	Ventilation naturelle	Sans Adjonction de MCP
32	calfeutré	Double vitrage	Store opaque	Isolé	Ventilation naturelle	Sans Adjonction de MCP
33	non calfeutré	Simple vitrage	Sans protection	Non isolé	Sans ventilation naturelle	Adjonction de MCP
34	calfeutré	Simple vitrage	Sans protection	Non isolé	Sans ventilation naturelle	Adjonction de MCP
35	non calfeutré	Double vitrage	Sans protection	Non isolé	Sans ventilation naturelle	Adjonction de MCP
36	calfeutré	Double vitrage	Sans protection	Non isolé	Sans ventilation naturelle	Adjonction de MCP
37	non calfeutré	Simple vitrage	Store opaque	Non isolé	Sans ventilation naturelle	Adjonction de MCP
38	calfeutré	Simple vitrage	Store opaque	Non isolé	Sans ventilation naturelle	Adjonction de MCP
39	non calfeutré	Double vitrage	Store opaque	Non isolé	Sans ventilation naturelle	Adjonction de MCP
40	calfeutré	Double vitrage	Store opaque	Non isolé	Sans ventilation naturelle	Adjonction de MCP
41	non calfeutré	Simple vitrage	Sans protection	Isolé	Sans ventilation naturelle	Adjonction de MCP
42	calfeutré	Simple vitrage	Sans protection	Isolé	Sans ventilation naturelle	Adjonction de MCP
43	non calfeutré	Double vitrage	Sans protection	Isolé	Sans ventilation naturelle	Adjonction de MCP
44	calfeutré	Double vitrage	Sans protection	Isolé	Sans ventilation naturelle	Adjonction de MCP
45	non calfeutré	Simple vitrage	Store opaque	Isolé	Sans ventilation naturelle	Adjonction de MCP
46	calfeutré	Simple vitrage	Store opaque	Isolé	Sans ventilation naturelle	Adjonction de MCP
47	non calfeutré	Double vitrage	Store opaque	Isolé	Sans ventilation naturelle	Adjonction de MCP
48	calfeutré	Double vitrage	Store opaque	Isolé	Sans ventilation naturelle	Adjonction de MCP
49	non calfeutré	Simple vitrage	Sans protection	Non isolé	Ventilation naturelle	Adjonction de MCP
50	calfeutré	Simple vitrage	Sans protection	Non isolé	Ventilation naturelle	Adjonction de MCP
51	non calfeutré	Double vitrage	Sans protection	Non isolé	Ventilation naturelle	Adjonction de MCP
52	calfeutré	Double vitrage	Sans protection	Non isolé	Ventilation naturelle	Adjonction de MCP
53	non calfeutré	Simple vitrage	Store opaque	Non isolé	Ventilation naturelle	Adjonction de MCP
54	calfeutré	Simple vitrage	Store opaque	Non isolé	Ventilation naturelle	Adjonction de MCP
55	non calfeutré	Double vitrage	Store opaque	Non isolé	Ventilation naturelle	Adjonction de MCP
56	calfeutré	Double vitrage	Store opaque	Non isolé	Ventilation naturelle	Adjonction de MCP
57	non calfeutré	Simple vitrage	Sans protection	Isolé	Ventilation naturelle	Adjonction de MCP
58	calfeutré	Simple vitrage	Sans protection	Isolé	Ventilation naturelle	Adjonction de MCP
59	non calfeutré	Double vitrage	Sans protection	Isolé	Ventilation naturelle	Adjonction de MCP
60	calfeutré	Double vitrage	Sans protection	Isolé	Ventilation naturelle	Adjonction de MCP
61	non calfeutré	Simple vitrage	Store opaque	Isolé	Ventilation naturelle	Adjonction de MCP
62	calfeutré	Simple vitrage	Store opaque	Isolé	Ventilation naturelle	Adjonction de MCP
63	non calfeutré	Double vitrage	Store opaque	Isolé	Ventilation naturelle	Adjonction de MCP
64	calfeutré	Double vitrage	Store opaque	Isolé	Ventilation naturelle	Adjonction de MCP

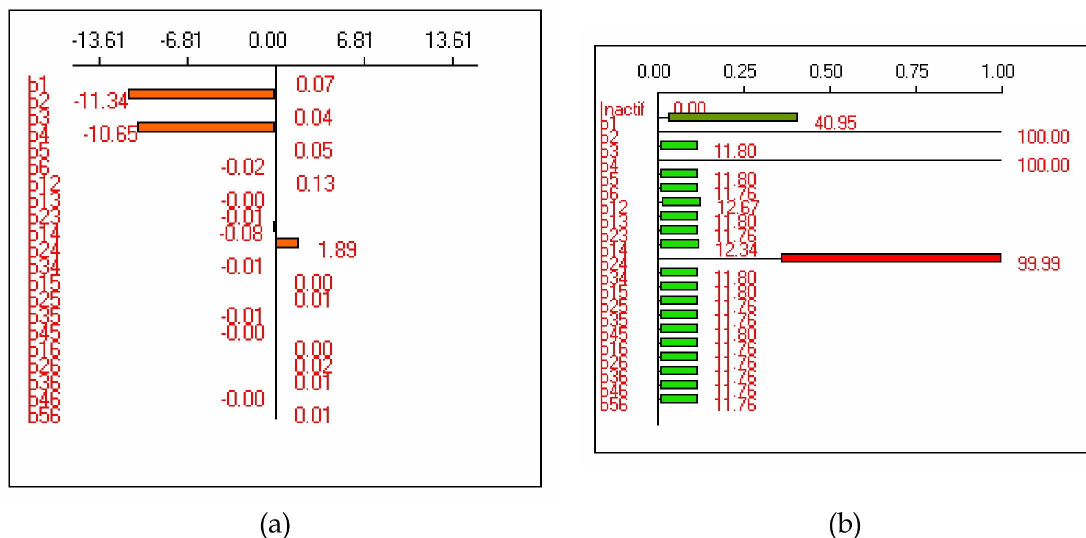
7.1.6.2. Résultats des plans d'expériences en période froide

Les résultats en besoins de chauffage et en indice de confort d'été (cf. § 7.1.6.3) sont présentés par des diagrammes Pareto et l'approche Bayesienne (cf. § 3.4) à Lille et à Marseille. Rappelons que le diagramme de Pareto (Figures (a)) représente la prépondérance des facteurs (causes) sur les réponses (besoins en chauffage et indice de confort d'été). Les coefficients correspondent au poids de la variation des facteurs sur les réponses. On les retrouve dans l'expression polynomiale de la réponse (Eq. 2). La longueur des barres est proportionnelle à l'importance des effets des facteurs. L'approche Bayesienne (Figures (b)) détermine la probabilité que chaque effet soit « actif ». L'étendue de probabilités est représentée sous forme d'histogramme pour chaque coefficient. Plus le bâton représentant les probabilités est déplacé vers la droite, plus grande est la probabilité pour que le facteur correspondant soit actif. La largeur du bâton donne la précision de l'effet. Les probabilités calculées dépendent des facteurs considérés. A titre d'information, les effets sûrement actifs sont ceux pour lesquels la probabilité minimale est supérieure à 50%. Les effets bij correspondent aux effets combinés de facteurs Xi et Xj. De même que bijk correspondent aux effets des facteurs Xi, Xj et Xk (et ainsi de suite).



(a) (b)

Figure 44. Effets de la réponse « Besoins en chauffage » à Lille pour logement collectif de 1900



(a) (b)

Figure 45. Effets de la réponse « Besoins en chauffage » à Marseille pour logement collectif de 1900

En hiver, les effets d'ordre supérieur à 2 ne sont pas significatifs : la représentation se limite donc aux effets d'ordre 2. Les figures précédentes se lisent de la façon suivante : dans le cas de coefficients négatifs, les besoins de chauffage diminuent lorsque la valeur des paramètres se déplace vers la borne supérieure. Les facteurs ayant des effets importants sont retenus pour les préconisations de rénovation en hiver[65].

Des effets similaires sont relevés à Lille et à Marseille. Deux facteurs principaux dominent dans les deux villes de façon très nette : le coefficient de déperditions des fenêtres et celui des murs par l'installation de matériaux d'isolation transparents, avec une prépondérance du coefficient de déperditions des fenêtres. Ils réduisent les besoins en chauffage de façon conséquente. Pour Marseille, l'interaction entre ces deux facteurs est étudiée :

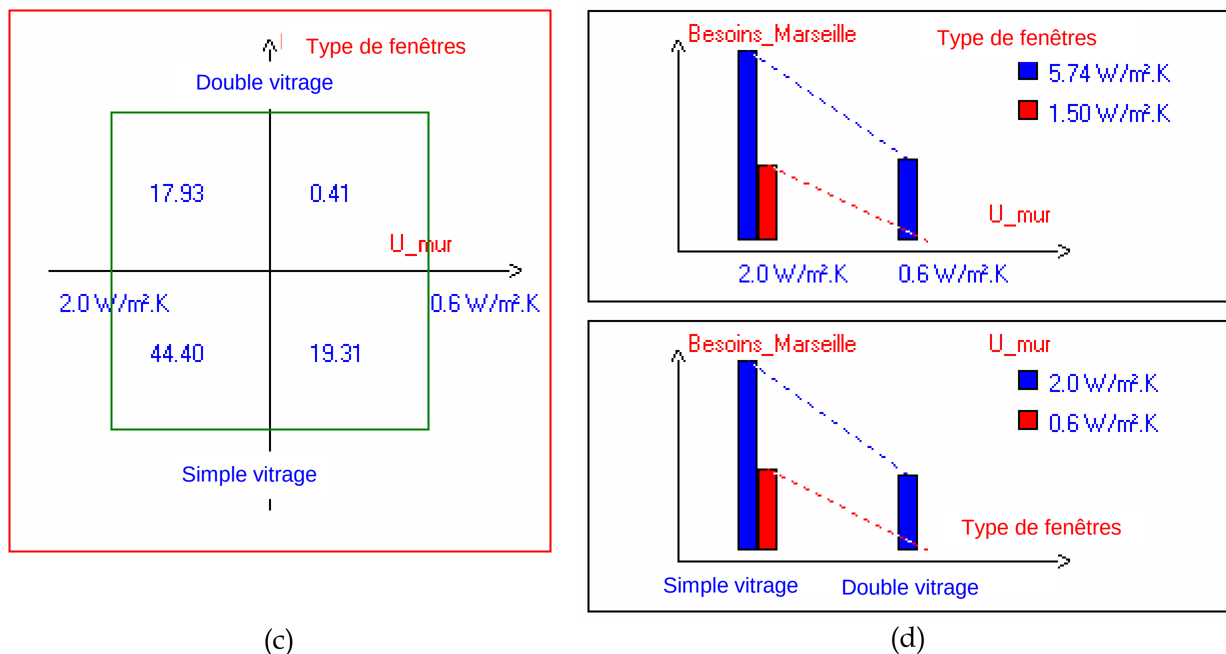


Figure 46. Etude des effets d'interaction X2 * X4 sur la réponse « Besoins en chauffage » du logement collectif de 1900 à Marseille

L'analyse de l'association des différents éléments se décline sous forme de diagrammes. On trouve :

Le diagramme classique des interactions (à gauche : (c)), les niveaux haut et bas sont indiqués pour chacun des facteurs. La réponse (besoins en chauffage ou indice de confort d'été) correspond aux valeurs de l'axe des abscisses et des ordonnées.

La représentation (sous forme de diagramme bâton : (d)) de la variation de la réponse pour un des facteurs de l'interaction pour un niveau fixé de l'autre facteur. Il s'agit de diagrammes représentant les effets d'interactions entre deux variables. Un des deux facteurs est représenté sur l'axe des abscisses. La valeur de la réponse est donnée en ordonnée pour chacun des deux niveaux du second facteur (couleurs différentes).

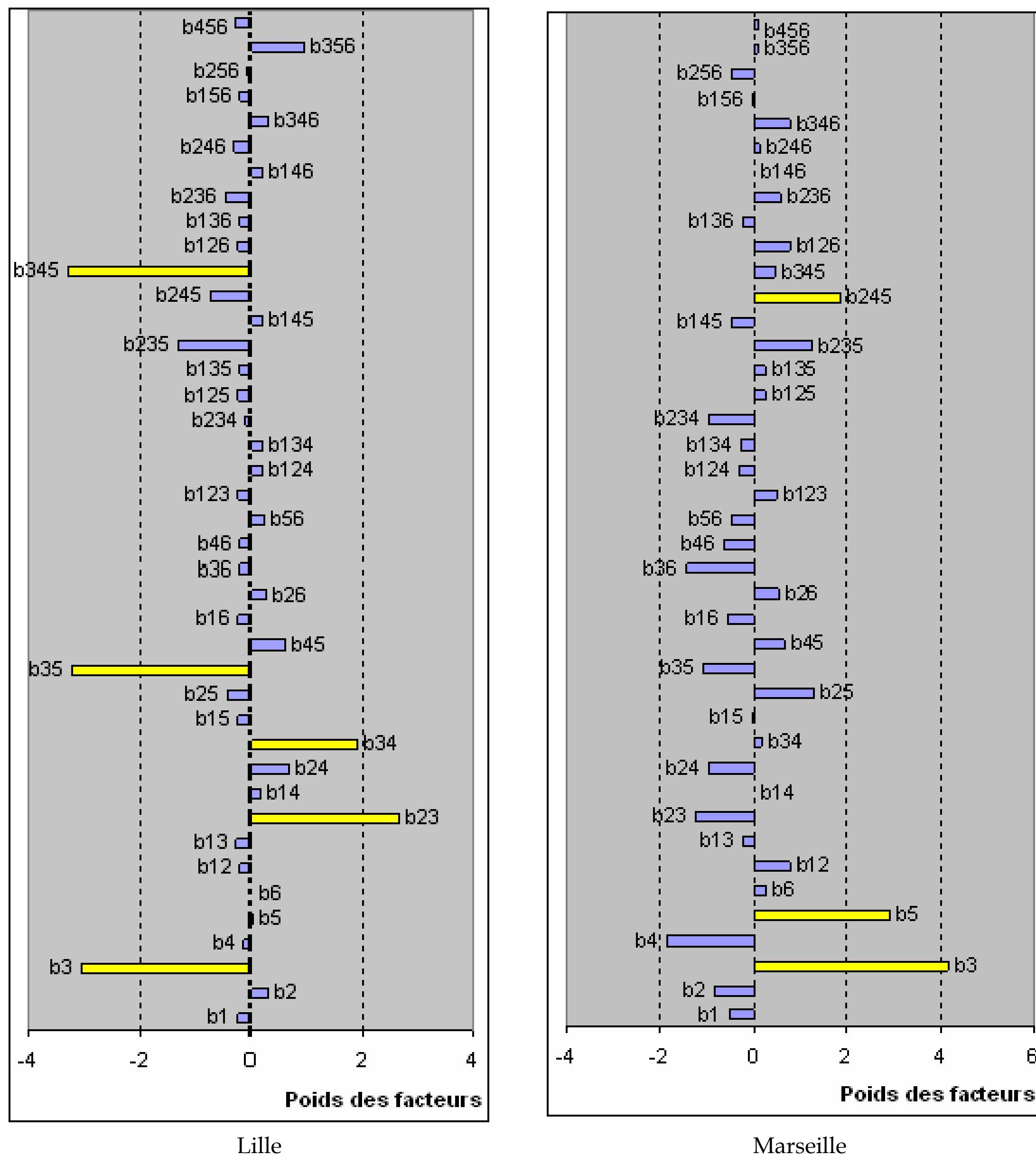
Les droites donnent la pente d'évolution de la réponse pour une variation du facteur représenté en abscisse. Il n'y a pas d'interaction lorsque cette pente d'évolution est indépendante du niveau du deuxième facteur.

[65] Notons qu'il n'y a pas de compromis à trouver pour le facteur solaire (qui est géré par des protections mobiles).

La Figure 46 montre que la rénovation de la fenêtre et la rénovation des murs produisent des effets similaires : elles réduisent de plus de moitié les besoins en chauffage. Il n'y a peu d'interaction entre ces éléments et les effets s'ajoutent (les pentes des droites sont quasiment identiques). Par rapport à un bâtiment non isolé (simple vitrage et murs anciens), l'amélioration du coefficient de déperditions des fenêtres combinée à l'isolation des murs, diminue donc de façon conséquente les besoins (le facteur 4 est largement atteint !). Bien que ces deux isolations ne soient pas corrélées, il est intéressant de noter qu'en les appliquant simultanément, on obtient une plus grande économie de chauffage. Qu'en est-il pour le confort d'été ?

7.1.6.3. Résultats des plans d'expériences en période chaude

Pour chacune des zones géographiques et pour les 64 expériences dictées par Nemrod, l'indice de confort d'été (cf. § 8.2.4.6) est déterminé.



Lille | Marseille

Figure 47. Graphe des effets sur la réponse « Indice de confort d'été » pour le logement collectif

Dans le cas de coefficients positifs, l'indice de confort d'été augmente lorsque la valeur des paramètres se déplace vers la borne supérieure.

Relevons les éléments du bâtiment permettant une amélioration du confort d'été :

- A Lille, le coefficient de déperditions des fenêtres ainsi que l'application de la ventilation nocturne. Ces deux facteurs ont néanmoins un poids faible sur la réponse étudiée.
- A Marseille, le facteur solaire des fenêtres (adjonction de volets), la ventilation nocturne et dans une moindre mesure l'amélioration de l'inertie. Notons par ailleurs que l'amélioration de l'indice de confort d'été est plus conséquente que dans le cas de Lille.

Le niveau du facteur solaire des fenêtres (protections solaires en journée en été) dégrade le confort d'été à Lille tandis qu'il l'améliore à Marseille. Ces résultats confirment l'analyse effectuée lors du diagnostic du bâtiment. Nous avions en effet noté qu'à Lille l'indice de confort calculé était surtout dû à de basses températures tandis qu'à Marseille, l'indice de confort est dû à de hautes températures. En outre, les préconisations d'hiver ne sont pas toujours favorables à l'amélioration du confort d'été. C'est le cas de l'installation de matériaux d'isolation transparents.

Finalement, l'association de certains éléments a une probabilité non négligeable d'avoir des effets sur le confort :

- A Lille, la présence de protection solaire et les matériaux d'isolation transparents d'une part et la présence de protection solaire et la ventilation nocturne d'autre part et enfin le type de fenêtres et la présence de protection solaire
- A Marseille, le type de fenêtres, la présence de protection solaire et la ventilation nocturne.

Pour les deux villes, en été, les associations des facteurs (les différents éléments du bâtiment) ont un impact conséquent sur l'indice de confort d'été. Comment s'explique cette interaction ? L'étude détaillée de ces interactions est maintenant présentée (cf. Figure 48 à Figure 53).

7.1.6.3.1. Etude des effets d'interaction à Lille

A Lille, les effets sont regroupés en fonction de leur importance sur la figure suivante :

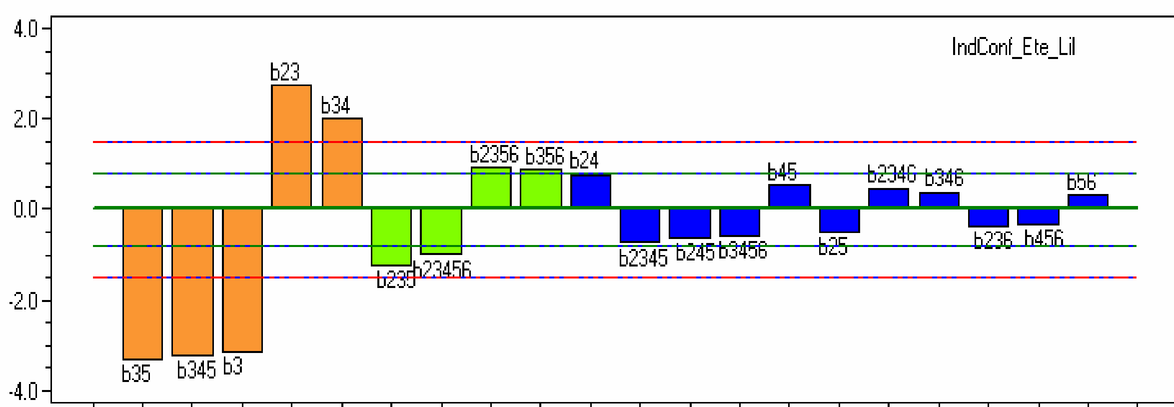


Figure 48. Etude des effets sur la réponse « Indice de confort d'été » pour logement collectif à Lille

Comme le facteur U1 (calfeutrement) ne participe à aucun effet d'interaction probablement actif, on peut donc l'interpréter : son effet est pratiquement nul.

Les effets b35, b345, b23 et b34 sont très probablement actifs, les effets b235, b23456, b2356 et b356 sont peut être actifs (en vert), les autres en bleu sont probablement inactifs (selon l'approche de Lenth[66]).

Par contre, selon les représentations graphiques Normal Plot et Half Normal Plot[67], on peut conclure que les effets b35, b345, b23 et b34 sont très probablement actifs :

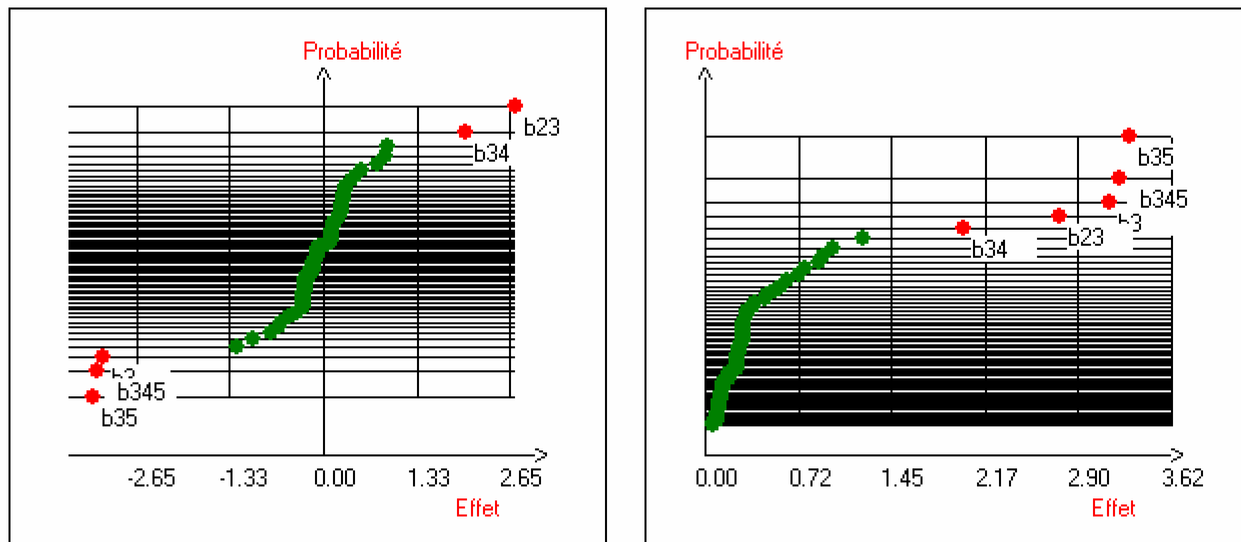


Figure 49. Représentations graphiques Normal Plot (à gauche) et Half Normal Plot (à droite) des effets sur la réponse « Indice de confort d'été » pour logement collectif à Lille

Afin d'étudier les effets d'interaction, on commence toujours par l'effet le plus indicé, dans cet exemple : b345. Si b345 est actif, alors on ne peut pas interpréter indépendamment tous les effets d'ordre moins élevé comportant uniquement seul ou en combinaison les indices 3, 4 et 5. Dans notre exemple : b34, b35, b45, b3, b4 et b5.

La Figure 47 et la Figure 48 montrent que les effets b4, b5 et b45 sont probablement inactifs. Analysons les représentations des autres combinaisons :

---

66 Dans le cas d'une matrice saturée, il n'existe pas de mesure de la variance expérimentale. Lenth a proposé une méthodologie pour calculer un pseudo écart type. Ce pseudo écart type est utilisé pour tracer des intervalles de confiance sur le graphique des effets. Ceux-ci définissent des seuils de significativité:

Les effets dont les barres vont au delà de l'intervalle extérieur sont dits " très probablement actifs ",
Ceux pour lesquels les barres restent en deçà de l'intervalle intérieur sont dits " très probablement inactifs "
Ceux dont les barres arrivent entre les deux limites sont dits " probablement actifs ".

67 Rappelons que ces graphiques sont représentés dans un système d'axes gausso arithmétique. L'axe vertical est gradué suivant une échelle en probabilité, l'axe horizontal est gradué suivant une échelle arithmétique. Ce type de graphe est utilisé pour vérifier si un ensemble de valeurs suit une distribution normale. Cette vérification se fait uniquement de façon visuelle donc subjective. Le principe de construction de ce type de graphe est très simple :

L'ensemble de N valeurs est ordonné suivant l'ordre croissant, (j = rang)
Ces N valeurs ordonnées sont portées sur le graphe en fonction de leur fréquence cumulée observée ((j-0,5)/N).

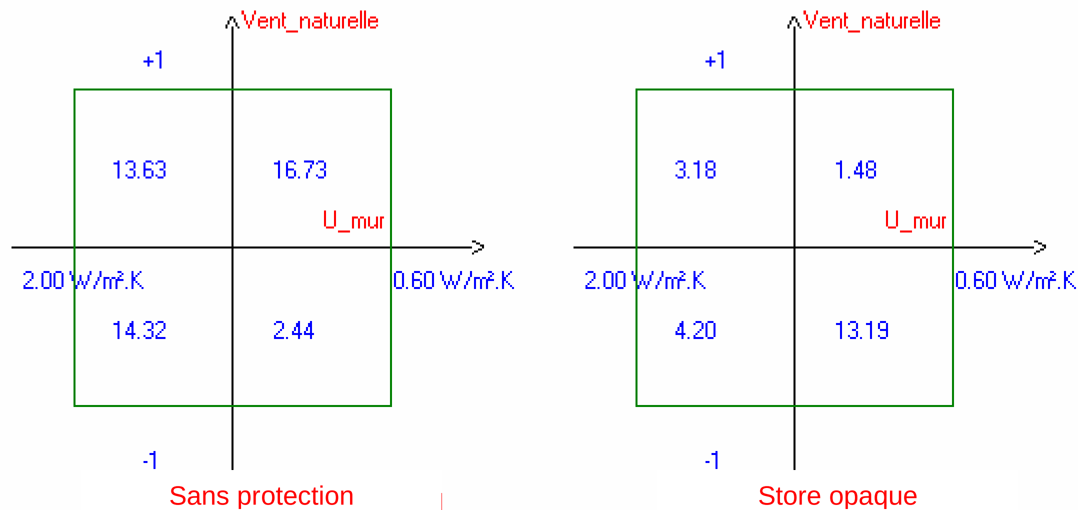


Figure 50. Etude des effets d'interaction X4 * X5 * X3 sur la réponse « Indice de confort d'été » pour le logement collectif à Lille

Quand le facteur U3 (Protection) est au niveau bas (pas de protection solaire), l'effet de la ventilation naturelle (du niveau -1 au niveau +1) est pratiquement nul si U_Mur est de 2 W/m².K (14.32 → 13.63) mais cet effet est très positif pour U_mur = 0.60W/m².K (2.44 → 16.73). Quand le facteur U3 (Protection) est au niveau haut (protection solaire), l'effet de la ventilation naturelle (du niveau -1 au niveau +1) est pratiquement nul si U_Mur est de 2 W/m².K (4.20 → 3.18) mais cet effet est très négatif pour U_mur = 0.60W/m².K (13.19 → 1.48).

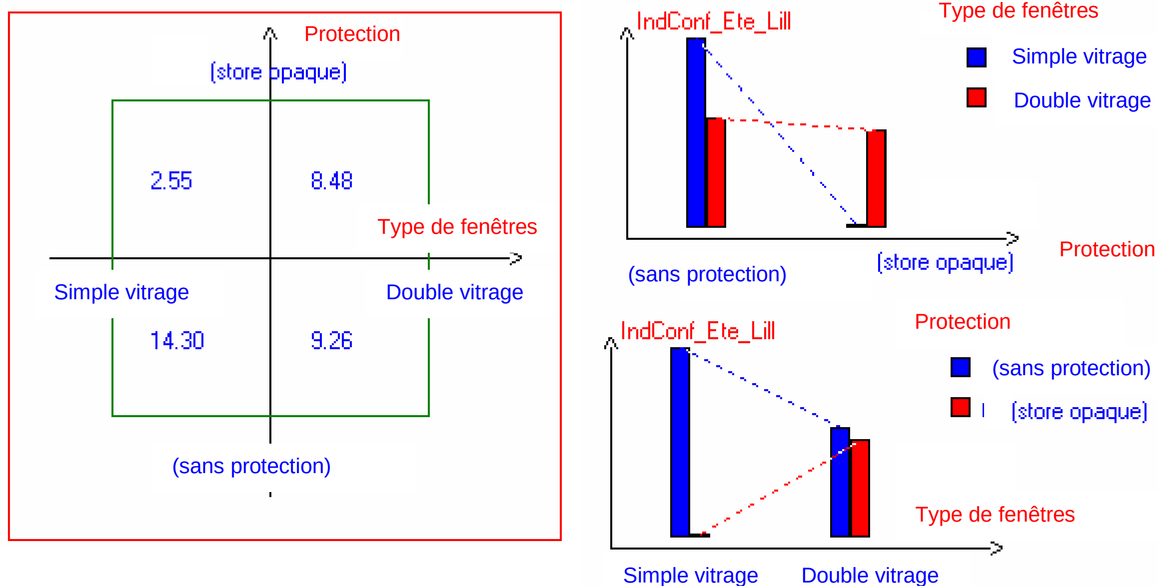


Figure 51. Etude des effets d'interaction X2 * X3 sur la réponse « Indice de confort d'été » du logement collectif de 1900 à Lille

L'effet du facteur « Protection » est fortement négatif si le bâtiment est équipé de simple vitrage (14.30 → 2.55) mais cet effet est pratiquement nul pour un double vitrage peu émissif (9.26 → 8.48).

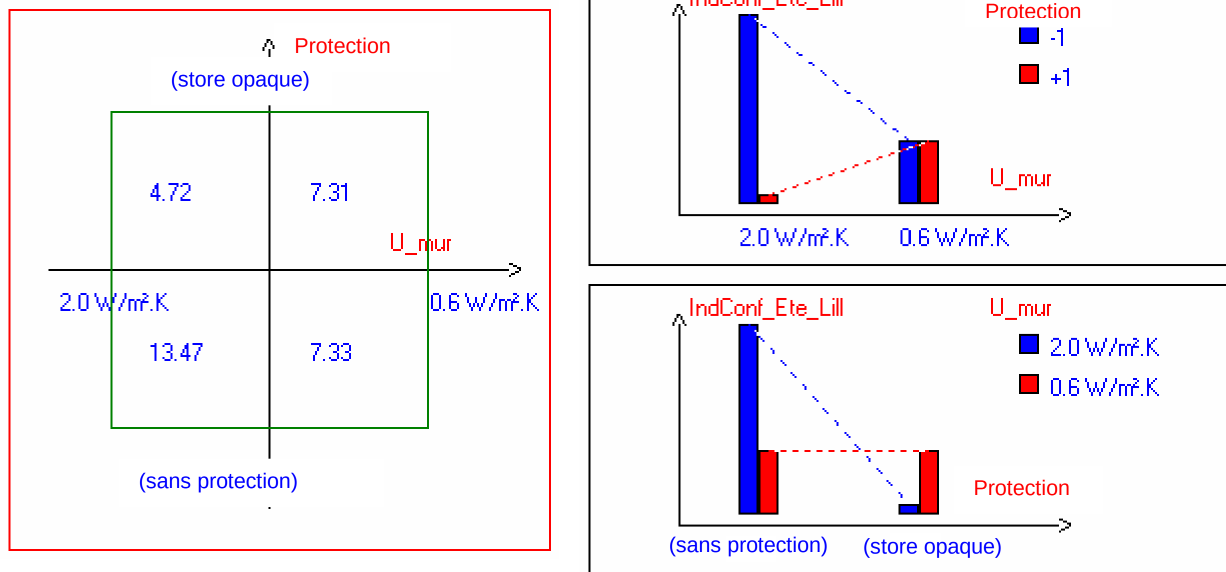


Figure 52. Etude des effets d'interaction X3 * X4 sur la réponse « Indice de confort d'été » du logement collectif de 1900 à Lille

L'effet du facteur « Protection » est fortement négatif si l'isolation du mur est au niveau bas (13.47 → 4.72) tandis qu'il est pratiquement nul si le mur est isolé (7.33→7.31).

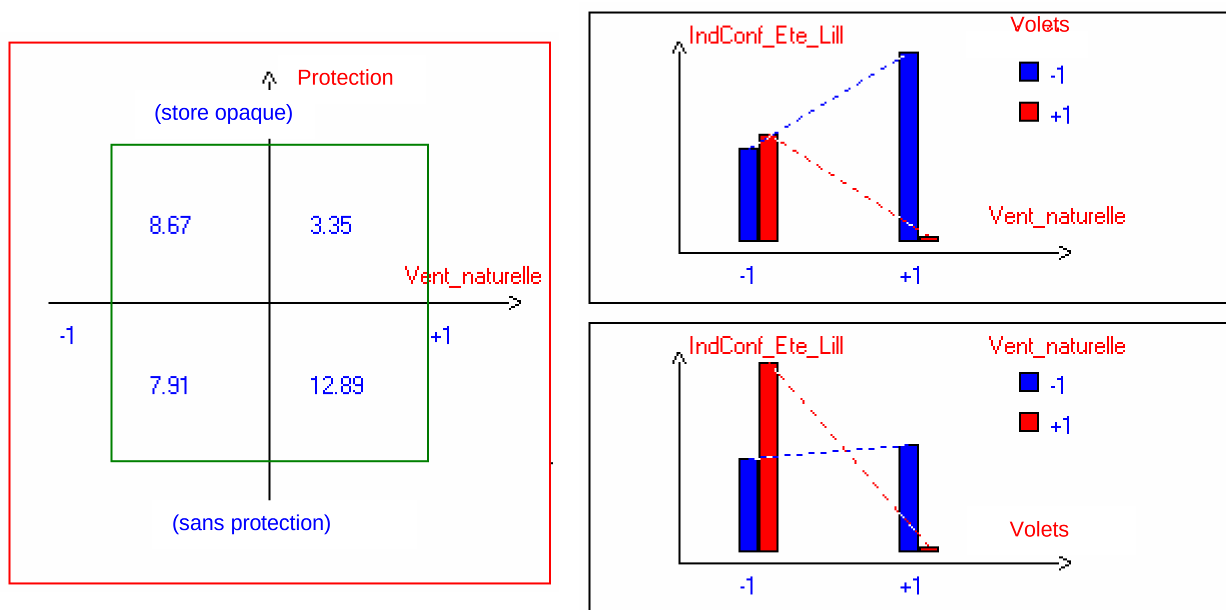


Figure 53. Etude des effets d'interaction X3 * X5 sur la réponse « Indice de confort d'été » du logement collectif de 1900 à Lille

L'effet du facteur « Protection » est pratiquement nul si la ventilation naturelle est au niveau bas (7.91→8.67) tandis qu'il est fortement négatif si la ventilation est au niveau élevé (ventilation naturelle) (12.89 → 3.35).

7.1.6.3.2. Etude des effets d'interaction à Marseille

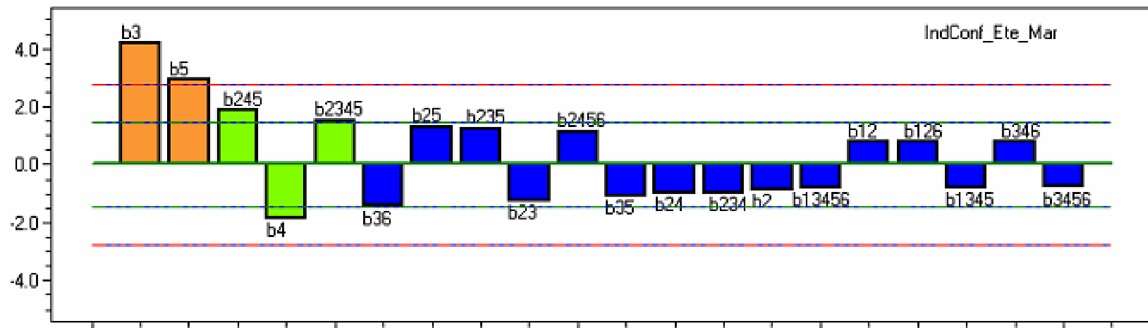


Figure 54. Etude des effets sur la réponse « Indice de confort d'été » pour logement collectif à Marseille

L'effet b245 est peut être actif (en vert), les autres en bleu sont probablement inactifs (selon l'approche de Lenth). Selon la représentation graphique Normal Plot et Half Normal Plot, on peut conclure que cet effet est très probablement actif :

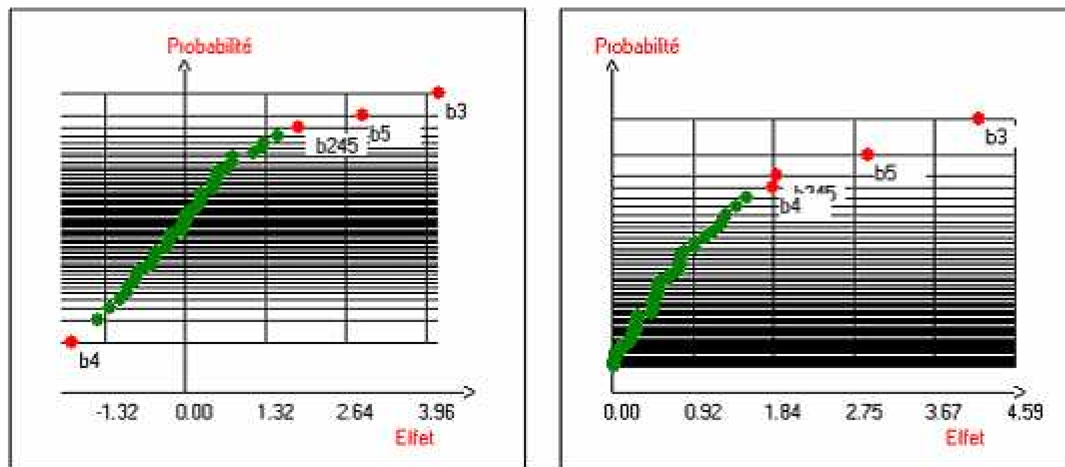


Figure 55. Représentation graphique Normal Plot (à gauche) et Half Normal Plot (à droite) des effets sur la réponse « Indice de confort d'été » pour logement collectif à Marseille

On commence toujours par l'effet le plus indicé, dans cet exemple : b245. Si b245 est actif, alors on ne peut pas interpréter indépendamment : tous les effets d'ordre moins élevé comportant uniquement seul ou en combinaison les indices 2, 4 et 5. Dans notre exemple : b24, b25, b45, b2, b4 et b5.

La Figure 47, la Figure 54 et la Figure 55 montrent que les effets b25, b24 et b45 sont probablement inactifs. L'effet b245 est analysé ci-dessous (cf. Figure 56) :
Quand le facteur U2 (Type de fenêtres) est au niveau bas (simple vitrage) l'effet de la ventilation naturelle (du niveau -1 au niveau +1) est pratiquement nul si U_{mur} est de 0.60 W/(m².K) (9.92 → 10.73), mais cet effet est positif pour U_{mur} = 2 W/(m².K) (9.29 → 14.90). On peut aussi dire que pour une ventilation naturelle au niveau -1, l'effet de U_{mur} est pratiquement nul (9.29→ 9.92) alors que pour une ventilation naturelle au niveau +1, l'effet de U_{mur} est négatif (14.90 → 10.73)).
Quand le facteur U2 (Type de fenêtres) est au niveau haut (double vitrage basse émissivité), l'effet de la ventilation naturelle (du niveau -1 au niveau +1) est positif pour U_{mur} = 2 W/(m².K) (10.68 → 14.02) et pour U_{mur} = 0.60 W/(m².K).

On peut aussi interpréter l'effet du facteur U3 : il est fortement positif.

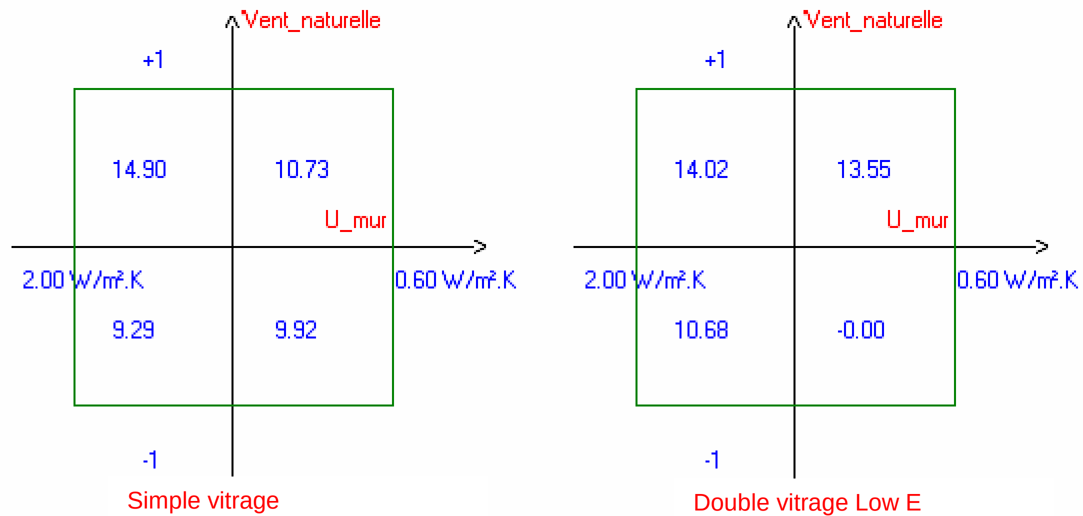


Figure 56. Etude des effets d'interaction X2 * X4 * X5 sur la réponse « Indice de confort d'été » pour le logement collectif à Marseille

7.1.7. Conclusions sur les plans d'expériences réalisés sur le logement collectif de 1900

L'étude des effets des différents facteurs a été réalisée. Au départ, nous avons considéré des plans de Hadamard (Flory-Celini *et al*, 2006) pour lesquels seuls les effets du premier ordre étaient étudiés. Cet exercice nous a permis de nous « initier » aux plans d'expériences. En intégrant des effets d'ordre supérieur, même s'ils nécessitent l'analyse de plusieurs phénomènes, les interprétations sont plus aisées. Cette étape requiert une certaine « expérience » de la méthode de façon à synthétiser toute la richesse de l'analyse. Une fois cette expérience acquise (par des exercices appropriés ou alors par une formation adéquate), il est alors possible d'interpréter les résultats :

Selon la zone géographique des résultats différents sont obtenus. Même si les priorités d'interventions sont similaires en période froide : installation de fenêtres performantes et adjonction de matériaux d'isolation transparents, des distinctions subsistent. C'est le cas par exemple des effets de couplage de ces deux éléments à Marseille sur les besoins en chauffage. C'est également le cas pour les effets sur l'indice de confort d'été. Un facteur de réduction de 10 est noté pour Lille et Marseille par l'association de ces deux éléments ! Le facteur 4 est donc largement atteint.

A Lille, l'adjonction de fenêtres performantes permet d'une part une réduction importante des besoins en chauffage (facteur prépondérant), mais c'est également l'élément isolé qui permet la meilleure amélioration du confort d'été. Au niveau des effets d'interaction relevés, les protections solaires, seules ou agissant avec d'autres facteurs ont des effets négatifs sur l'indice de confort d'été.

A Marseille, les solutions favorisant la réduction des besoins en chauffage dégradent l'indice de confort d'été. En revanche, le couplage de ces solutions avec des volets, la ventilation nocturne ou encore l'inertie (dans une moindre mesure) compense sinon améliore ce phénomène.

L'analyse des effets des facteurs et des résultats de simulations aboutit aux préconisations décrites dans le paragraphe suivant.

7.1.8. Organigrammes décisionnels pour le logement collectif de 1900

Les plans d'expériences ont permis d'apprécier les effets de la variation de l'état des facteurs sur la réduction des besoins en chauffage et l'amélioration de l'indice de confort d'été. L'exploitation de ces résultats aboutit aux organigrammes décisionnels présentés ci-dessous. De façon à repérer les rénovations prioritaires, nous avons choisi d'illustrer les résultats des plans par un graphe synthétique classifiant l'importance des différents facteurs par ordre croissant. Les priorités sont indiquées par ordre décroissant (1 représentant l'intervention prioritaire). Les éléments dont les interactions sont importantes sont reliés par des flèches. Au niveau de la légende, le bleu représente les solutions favorisant la réduction des besoins en chauffage, le jaune, l'amélioration de l'indice de confort d'été, et le blanc, les solutions répondant aux contraintes des deux périodes (cf. § 4.6).

7.1.8.1. Appartement situé à Lille

La priorité se situe au niveau de la réduction des besoins en chauffage. Les solutions installées dans cet objectif ont l'avantage de favoriser le confort d'été. Les préconisations suivantes sont donc retenues :

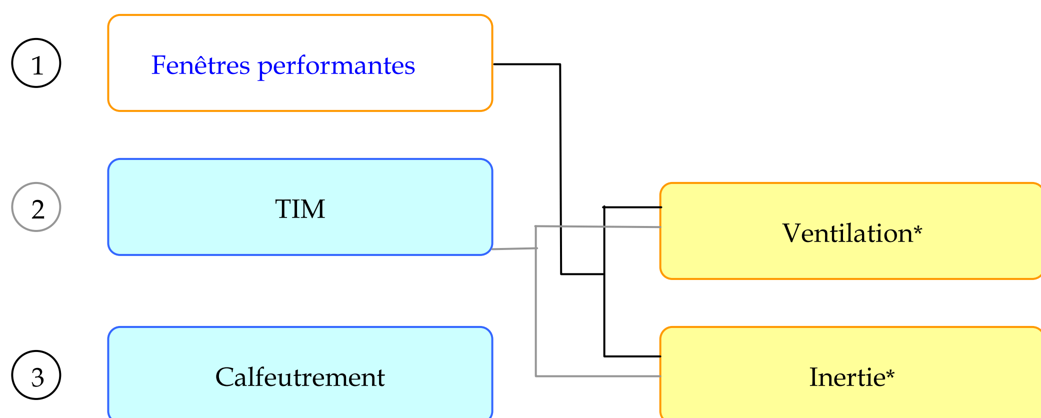


Figure 57. Organigramme décisionnel du logement collectif de 1900 à Lille : les chiffres de 1 à 6 indiquent l'ordre des priorités d'intervention

* Ces solutions devraient être combinées aux deux premières préconisations (fenêtres performantes et matériaux d'isolation transparents).

7.1.8.2. Appartement situé à Marseille

En revanche à Marseille, l'amélioration de l'isolation des éléments cause une détérioration du confort. Les plans d'expériences montrent cette fois-ci que l'installation de protections solaires ainsi que la ventilation nocturne, augmentent le nombre d'heures où l'occupant est en situation de confort. En outre, l'interaction de ces facteurs a des conséquences sur le confort. Ceci oblige à considérer dans les préconisations l'application simultanée de ces deux stratégies.

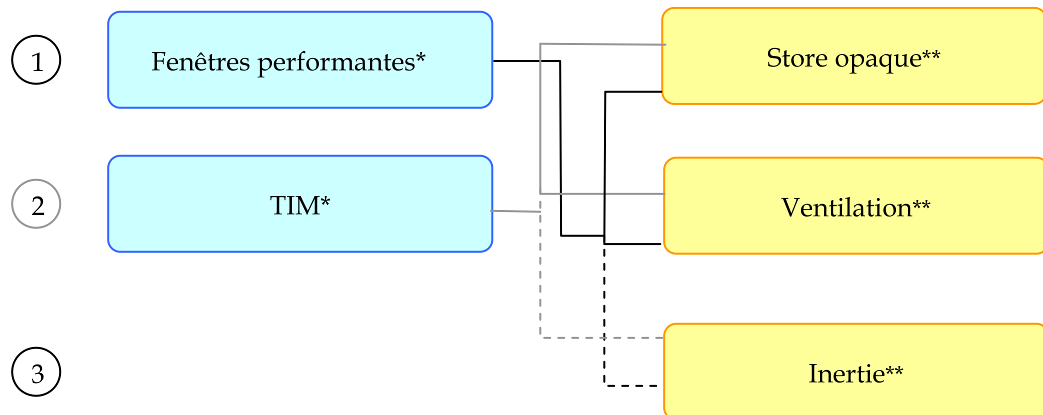


Figure 58. Organigramme décisionnel du logement collectif de 1900 à Marseille

* Afin de ne pas dégrader le confort d'été, ces solutions devraient être associées à ces éléments telles que des protections solaires et / ou à la ventilation nocturne.

** Ces solutions devraient être combinées aux deux premières préconisations (fenêtres performantes et matériaux d'isolation transparents).

L'avantage des résultats obtenus réside dans le fait que les solutions proposées pour les deux saisons sont conciliables. Ainsi, le facteur solaire bien que n'ayant pas une forte incidence en hiver, sera réduit par des protections mobiles durant la saison chaude. Un bon compromis entre ces deux périodes est donc trouvé.

7.1.9. Comparaison des solutions bioclimatiques sur le logement collectif de 1900

Pour les différents indicateurs, les solutions sont comparées et les résultats sont représentés sur la Figure 59 et la Figure 60. A Lille, les dispositifs favorisant le meilleur compromis sont : l'installation de fenêtres performantes et de matériaux à isolation transparents associés à la ventilation naturelle, tandis qu'à Marseille c'est la même combinaison qu'à Lille à laquelle on adjoint des stores opaques (notons que l'amélioration de l'inertie procure des performances équivalentes). Ainsi, à Lille en terme de besoins de chauffage on les réduit d'un facteur 10 par rapport au bâtiment non rénové tandis qu'à Marseille, l'indice de confort d'été passe de 0 à près de 20.

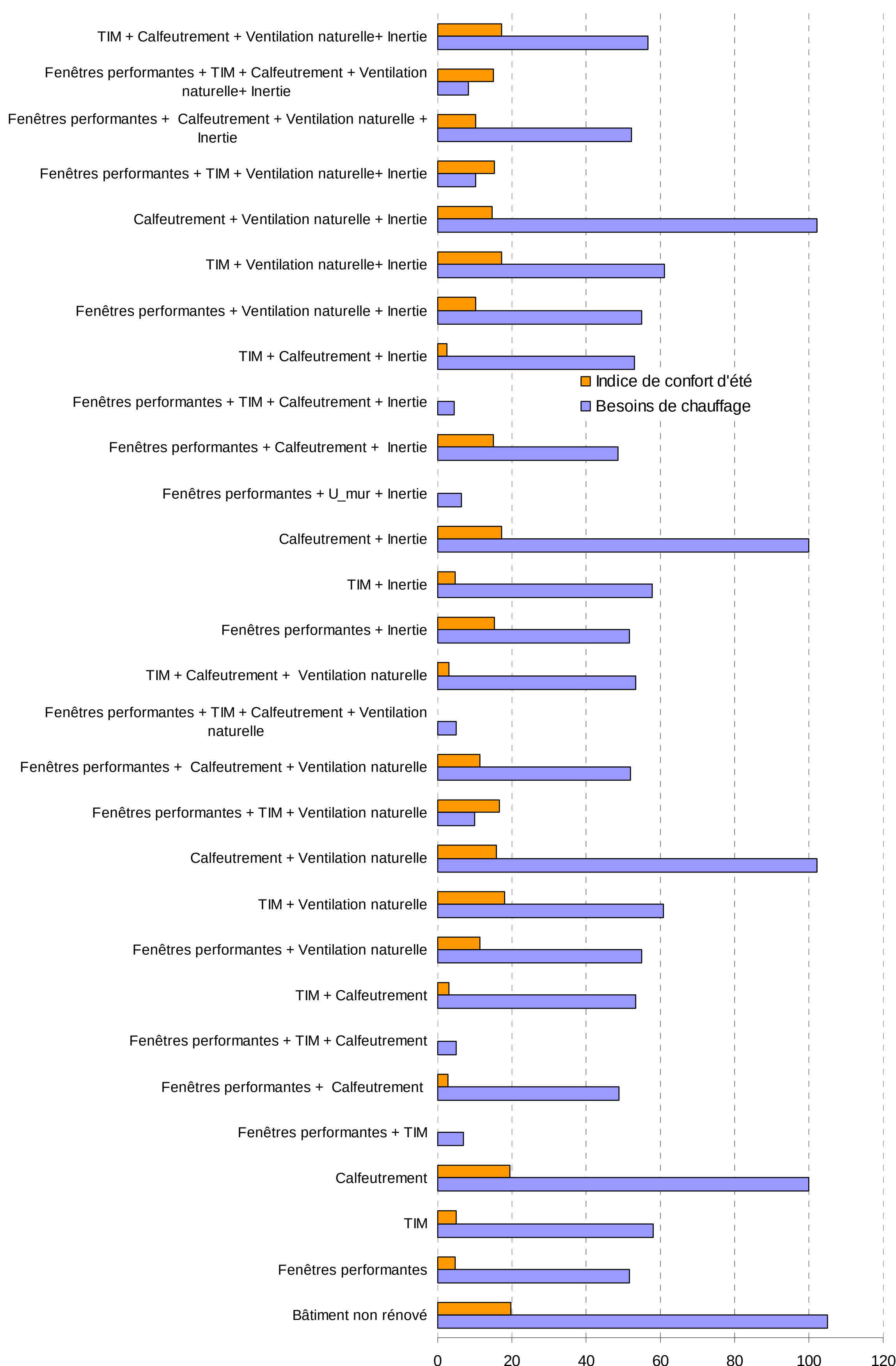


Figure 59. Comparaison des différentes solutions pour le logement collectif situé à Lille

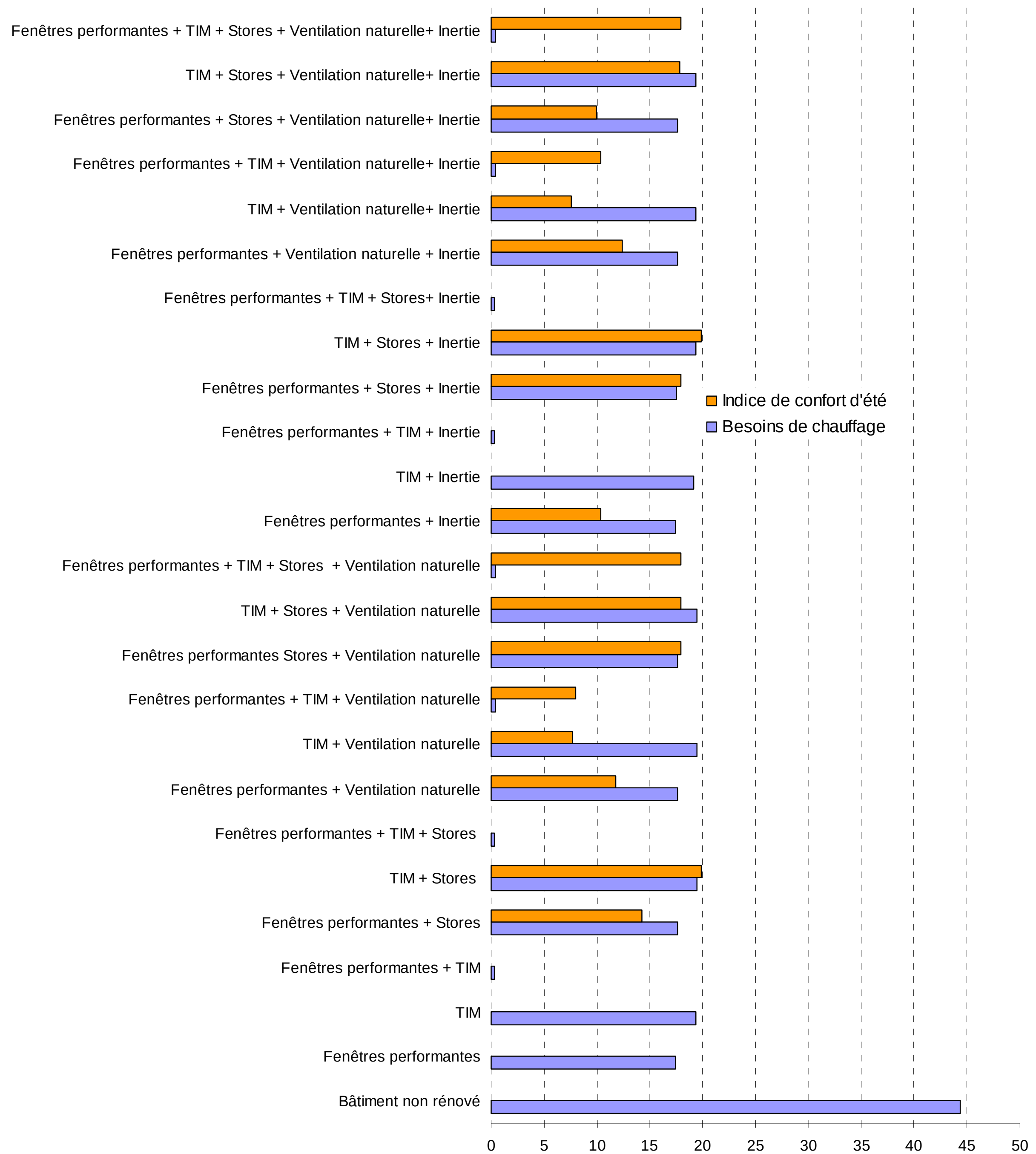


Figure 60. Comparaison des différentes solutions pour le logement collectif situé à Marseille

7.2. Méthodologie appliquée à une maison individuelle construite en 1966

Ce bâtiment correspond à la troisième grande période de construction qui va de 1945 à 1974 (date de la première réglementation thermique). C'est le début des Trente Glorieuses, période de reconstruction rapide après la seconde guerre mondiale.

Face à la multiplication des cités dortoirs, dès 1966, une majorité de français aspire au pavillon individuel. (Graulière, 2005) repère une seule famille d'habitat individuel, sous le nom de pavillon de la reconstruction, typique et banal. L'auteur note également que ce type de construction est facilement identifiable avec ses enduits ciments, ses barres d'appui rondes, ses formes cubiques, ses fenêtres proches du carré. Il s'en construit sur tout le territoire français, dans les villages détruits par la guerre comme dans les banlieues des plus grandes villes.

7.2.1. Typologie d'une maison individuelle des années 1950 à 1975

Le bâtiment de référence de 1966 a été réalisé par (Ministère de l'équipement et du logement, 1971). Il est constitué de 3 niveaux : le sous-sol, le rez-de-chaussée (séjour, pièces de service, chambres 1 à 3) et d'un étage (chambres 4 et 5, greniers 1 et 2 et placards) sur une surface habitable de 120m² (hors garage, cave et greniers). La pente de la toiture est de 45°.

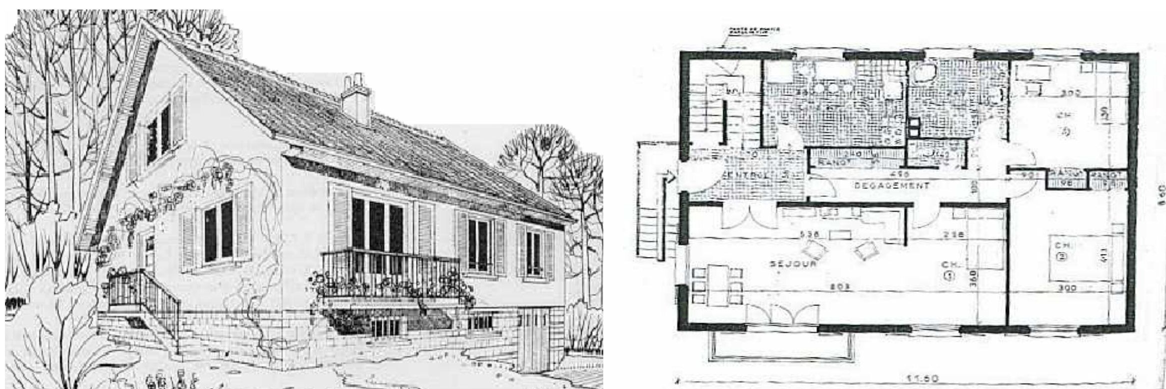


Figure 61. Descriptif du bâtiment de 1966 (Ministère de l'équipement et du logement, 1971)

Notons que cette maison possède un plafond sous toiture moyennement isolé (5 cm de laine de verre).

Tableau 42. Caractéristiques thermo physiques des parois et des matériaux utilisés

Matériaux	ρ Densité [kg/m³]	Cp Capacité [kJ/kg.K]	λ Conductivité [W/m.K]
Béton de cailloux	2200	1	1.50
Parpaing plein	1500	1	0.69
Bois lourd	650	2,4	0.23
Hourdis Béton	1300	0.65	1.33
Carrelage	2300	0.7	1.70
Parpaing 10	1300	0.65	1.11
Carrelage plein	790	0.801	0.36
Laine de verre	12	0.84	0.04
Ardoise	2700	0.75	2.11
Brique creuse	720	0.79	0.61

Tableau 43. Composition des parois[68]

	Matériau	Epaisseur [cm]	U [W/ (m².K)]	Coefficients d'absorption	
				Intérieur	Extérieur
PLANCHER_SS	Béton cailloux	20	3,297	0,4	0,8
MUR_EXT_SS	Parpaing plein	20	2,183	0,6	0,6
PORTE	Bois Lourd	5	2,585	0,7	0,7
PLANCHER_BAS	Hourdis Béton	20	3,069	0,5	0,7
	Carrelage	1			
MUR_EXT_FAÇADES	Brique creuse	22,5	1,858	0,45	0,45
MUR_INT	Parpaing	12	3,6	0,45	0,45
CLOISON_PLATRE	Carrelage plein	5	3,242	0,45	0,45
PORTE_ISOPLANE	Bois lourd	3,4	3,15	0,7	0,7
TOITURE	Ardoise	1	0,717	0,7	0,89
	Laine de verre	5			

Tableau 44. Dimensions et orientations des surfaces vitrées

Pièces	Orientations	Surface [m²]	Hauteur par rapport au sol [m]
Sous-sol	Nord	0,5	1,3
	Sud	0,5	1,3
Séjour / Chambre 1	Sud	4,515	2
	Sud	1,75	3,05
	Ouest	1,75	3,05
Chambre 2	Sud	1,75	3,05
Chambre 3	Nord	1,75	3,05
Pièces des services	Nord	3,5	3,05
Chambre 4	Ouest	1,75	5,55
Chambre 5	Est	1,75	5,55

7.2.2. Modélisation de la maison individuelle d'après guerre

Les hypothèses de simulation sont présentées. Elles sont suivies du descriptif des modèles thermique et aéraulique. Ces deux premières étapes permettent de réaliser alors le diagnostic du bâtiment.

[68] Les couches d'une paroi sont définies de l'extérieur vers l'intérieur de la zone.

7.2.2.1. Hypothèses de simulation

Concernant les charges internes et le métabolisme, les mêmes hypothèses que pour le logement collectif sont retenues. Pour la modélisation de l'humidité, les résultats suivants sont obtenus :

Tableau 45. Coefficients d'humidité considérés dans les différentes pièces

Pièces	K_{surf}	M_{surf}	$ß_{surf}$	K_{deep}	M_{deep}	$ß_{deep}$
Sous-sol	0.04	8394	32.25	1	335.8	99.76
Pièces de services	0.02	3183.2	12.61	1	63.66	37.83
Séjour / Chambre 1	0.02	2692.64	10.67	1	53.8	32
Chambre 2	0.02	1464.12	5.8	1	29.28	17.4
Chambre 3	0.02	1054.33	4.17	1	21.08	12.53
Chambre 4	0.02	1346.32	5.33	1	26.92	16
Chambre 5	0.02	1211.68	4.8	1	24.23	14.4
Placards	0.02	1346.32	5.33	1	26.92	16

7.2.2.2. Découpage des zones thermiques dans TRNBUILD

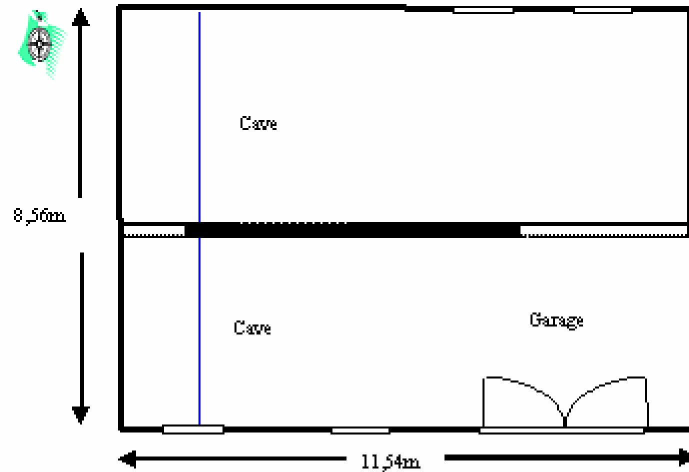


Figure 62. Plan du sous-sol

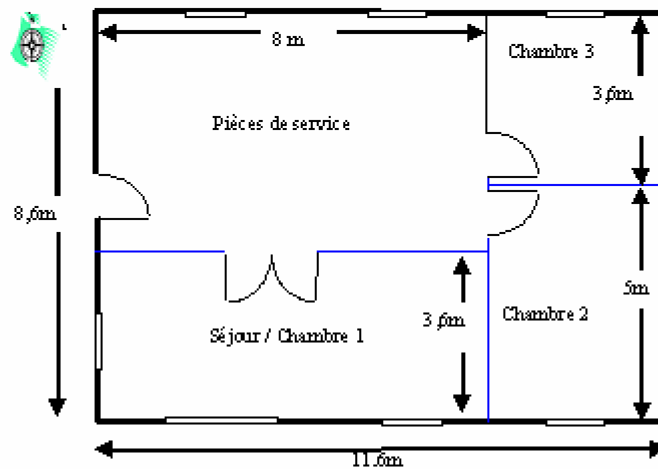


Figure 63. Plan du rez-de-chaussée

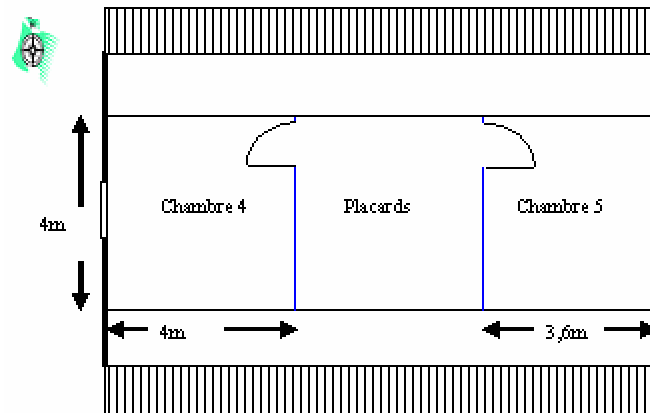


Figure 64. Plan de l'étage

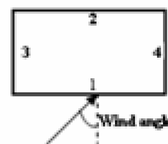
7.2.2.3. Modélisation aéraulique

Afin de tenir compte du vent, une hauteur de 7,5m entre le sol et le faîte de la toiture est renseignée dans TRNFLOW.

Pour des bâtiments allant jusqu'à trois étages, (Orme *et al*, 1998) propose des coefficients cp en fonction de la direction du vent, pour des sites exposé, semi protégé ou protégé. On suppose que site est semi protégé ce qui correspond à un environnement rural avec quelques obstructions équivalentes à la moitié de la hauteur du bâtiment.

(Orme *et al*, 1998) fournit les cp pour des rapports largeur / hauteur de bâtiment égaux à 1 ou 2. Ce rapport vaut environ 1,35 pour le bâtiment de référence. Nous réalisons donc une interpolation linéaire de façon de nous rapprocher au mieux de la réalité. Le vent dominant est supposé orienter Nord. Le profil de vent considéré est : « Forêt, petite ville, banlieue » avec α=0,3.

Tableau 46. Angle de direction du vent et valeurs de c_p



Site semi protégé		Wind Angle							
		0°	45°	90°	135°	180°	225°	270°	315°
Face 1 (Nord)		0,35	0,09	-0,32	-0,44	-0,30	-0,44	-0,32	0,09
Face 2 (Sud)		-0,22	-0,44	-0,32	0,09	0,35	0,09	-0,32	-0,44
Face 3 (Est)		-0,40	0,13	0,40	0,13	-0,40	-0,40	-0,30	-0,40
Face 4 (Ouest)		-0,40	-0,40	-0,23	-0,40	-0,40	0,24	0,43	0,13
Roof (10°-30° pitch)	Front	-0,44	-0,50	-0,55	-0,48	-0,38	-0,48	-0,55	-0,50
	Rear	-0,38	-0,48	-0,55	-0,50	-0,44	-0,50	-0,55	-0,48

Caractéristiques des zones dans la modélisation aéraulique : Outre les fissures provoquées par les fenêtres et les portes, celles présentent sur les plafonds sont également considérées. Les fissures dues à la présence d'une cheminée ou encore d'un système actif de chauffage ne sont pas intégrées. Le nombre de zones est 10.

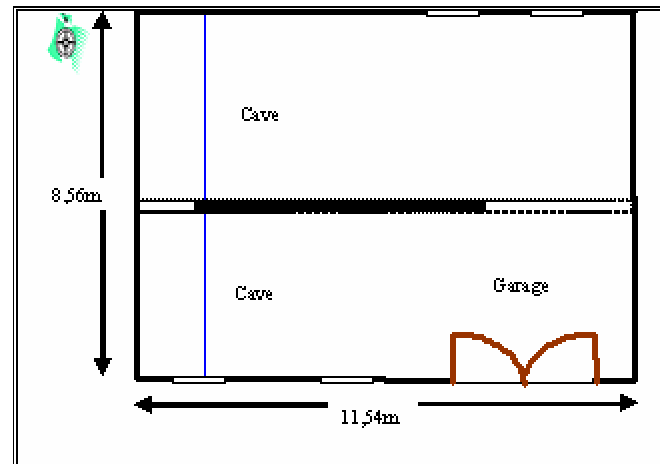


Figure 65. Plan du sous-sol

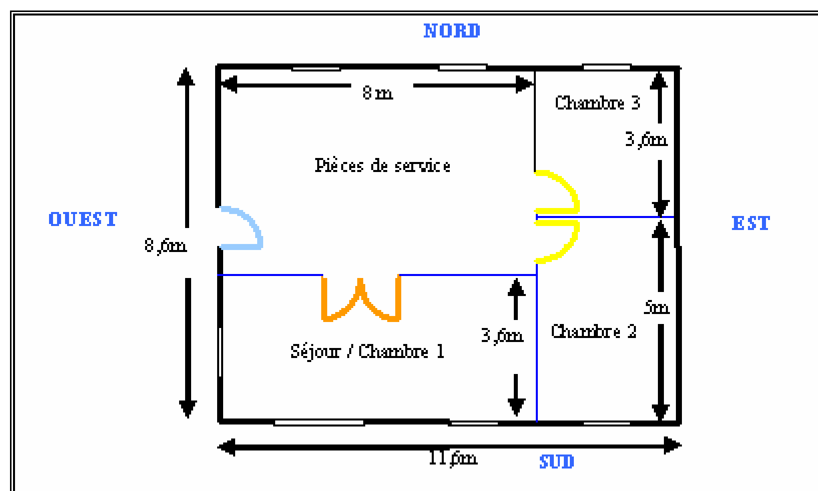


Figure 66. Plan du rez-de-chaussée (Hauteur 2,5m)

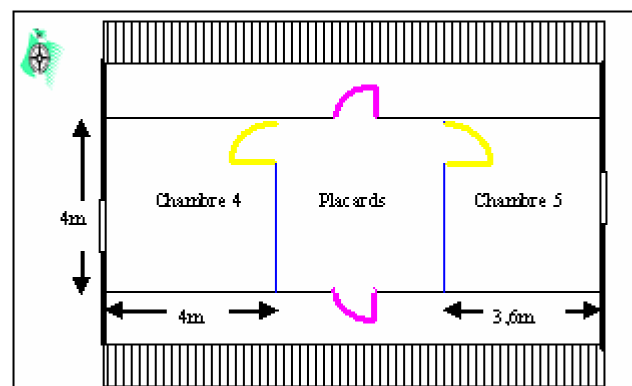


Figure 67. Plan de l'étage

Tableau 47. Dimensions des portes

	Désignation sous TRNFLOW	Dimensions
Porte sous-sol extérieure	PORTSS005	2*2,61 = 5,22 m²
Petite porte intérieure	PTPTEINT001	2*1,375 =2 ,75 m²
Grande Porte RDC	GDPTERDC002	2*1,595 = 3,19 m²
Porte extérieure	PORTEXT004	2*1,875 = 3,75 m²
Petite porte étage	PTPTEETA003	1*1 = 1 m²

Tableau 48. Adjacence des zones

Adjacence	Extérieur	Sous-sol	Pièces de service	Séjour / Chambre 1	Chambre 2	Chambre 3	Grenier 1	Chambre 4	Placards	Chambre 5	Grenier 2
Sous-sol	SUD										
Pièces de service	OUEST										
Séjour / Chamb 1											
Chambre 2											
Chambre 3											
Grenier 1											
Chambre 4											
Placards											
Chambre 5											
Grenier 2											

Les couleurs sont à faire correspondre aux dimensions des portes indiquées dans le Tableau 47. Pour les portes internes l'utilisateur doit spécifier les coefficients de décharge Cd sous TRNFLOW (cf. Annexe : Vent et ventilation naturelle). Pour ce faire, le rapport H_{porte} / $H_{pièce}$ doit être spécifié :

Tableau 49. Calcul du coefficient de décharge sous TRNFLOW pour les ouvertures internes

	Hauteur Porte	Hauteur pièce	Hrel	Cd	Cs (kg/(s.m.Pa^n))	n
Petite porte intérieure et Grande porte RDC	2	2,5	0,8	0,4212	$2,4.10^{-4}$	0,6
Petite porte étage	1	1,3	0,77	0,40293	2,4.10-4	0,6

Les portes intérieures sont supposées ouvertes à moitié durant toute la période de simulation. Les dimensions et orientations des fenêtres sont décrites dans le Tableau 44. Pour le coefficient de décharge entre les fenêtres et l'extérieur : le calcul interne à TRNFLOW est retenu. Les coefficients d'infiltration d'air et de débit d'air ainsi que la stratégie d'ouverture des fenêtres sont identiques à ceux définis pour le logement collectif.

7.2.3. Diagnostic de l'existant

Les résultats sont obtenus pour différentes météos dans TRNSYS. La surface chauffée est de 120m². Les besoins en hiver ainsi que l'indice de confort en été sont évalués et les résultats obtenus par simulation sous TRNSYS sont indiqués dans les tableaux suivants :

Tableau 50. Evaluation du confort adaptif sur différentes périodes de la maison individuelle de 1966

	Pièces	Orientation des vitrages	Lille	Marseille
Mai	Séjour	Sud Ouest	9	25
	Pièces de services	Nord Ouest	6	23
	Chambre 4	Ouest	10	22
Juillet	Séjour	Sud Ouest	23	36
	Pièces de services	Nord Ouest	22	49
	Chambre 4	Ouest	23	25
Septembre	Séjour	Sud Ouest	1	41
	Pièces de services	Nord Ouest	0	39
	Chambre 4	Ouest	28	8
Mai à septembre	Séjour	Sud Ouest	7	32
	Pièces de services	Nord Ouest	6	32
	Chambre 4	Ouest	9	24

Tableau 51. Besoins de la maison individuelle de 1966

Besoins (kWh/m^2.an)	Lille	Marseille
Chauffage	307.68	159.19
Refroidissement	3.01	30.60

7.2.4. Plans d'expériences sur la maison individuelle de 1966

On s'intéresse cette fois-ci aux effets d'interaction principaux et du premier ordre. Pour ce faire, les plans de Rechtschaffner sont retenus. Pour chacune des météos, l'utilisateur doit donc réaliser 37 expériences.

7.2.4.1. Etablissement de la stratégie expérimentale sur la maison individuelle de 1966

Afin de tester les différentes possibilités du logiciel Nemrod, nous avons cette fois ci intégré les plus grandes valeurs algébriques en borne supérieure. Sur les graphes de sortie, il faudra veiller à considérer les bornes supérieures du Tableau 52. Le calfeutrement est dans cet exercice directement associé à la rénovation des éléments (fenêtres, murs, toiture). Notons que pour la toiture, une isolation de 5 cm était déjà installée. La rénovation du plancher consiste à installer un isolant au niveau du sous-sol.

Tableau 52. Niveaux des facteurs de la maison individuelle de 1966

	Facteurs	Plage de variation	
		Borne inférieure	Borne supérieure
Fenêtres	U_1 : Conductivité thermique des fenêtres	1,5 W/m^2.K (Double Low E Argon)	5,74 W/m^2.K (Simple vitrage)
	U_2 : Facteur solaire des fenêtres	0,1 (Protection solaire)	0,87 (Simple vitrage)
Murs	U_3 : Coefficient de conductivité thermique des murs	0,6 W/m^2.K (Adjonction de matériau à isolation transparent)	2 W/m^2.K
Ventilation	U_4 : Ventilation	0	1
Plancher	U_5 : Coefficient de conductivité thermique du plancher	0,251 W/m^2.K (15cm de laine de verre et 2cm d'enduit extérieur)	3,012 W/m^2.K
Inertie	U_6 : Inertie	Niveau 1	Niveau 2 (Adjonction de MCP dans les cloisons légères)
Toiture	U_7 : Coefficient de conductivité de la toiture	0,133 W/m^2.K (25 cm d'isolation λ=0,04W/m.K sans pont thermique)	0,713 W/m^2.K
Position isolation	U_8 : Position de l'isolant	Isolation intérieure	Isolation extérieure (sans pont thermique)

Tableau 53. Plan d'expérimentation réalisé sur la maison individuelle de 1966

N° Exp	Type de fenêtres	Protection	Isolation des murs	Ventilation naturelle	Uplancher	Inertie	Utoiture	Position Isolant mur
1	Fenêtres performantes	Store opaque	0.24	Niveau N°1	0.251	Sans adjonction de MCP	0.133	Isolation intérieure
2	Fenêtres performantes	Sans protection	2.00	Niveau N°2	3.297	Adjonction de MCP	0.713	Isolation extérieure
3	Fenêtres existantes	Store opaque	2.00	Niveau N°2	3.297	Adjonction de MCP	0.713	Isolation extérieure
4	Fenêtres existantes	Sans protection	0.24	Niveau N°2	3.297	Adjonction de MCP	0.713	Isolation extérieure
5	Fenêtres existantes	Sans protection	2.00	Niveau N°1	3.297	Adjonction de MCP	0.713	Isolation extérieure
6	Fenêtres existantes	Sans protection	2.00	Niveau N°2	0.251	Adjonction de MCP	0.713	Isolation extérieure
7	Fenêtres existantes	Sans protection	2.00	Niveau N°2	3.297	Sans adjonction de MCP	0.713	Isolation extérieure
8	Fenêtres existantes	Sans protection	2.00	Niveau N°2	3.297	Adjonction de MCP	0.133	Isolation extérieure
9	Fenêtres existantes	Sans protection	2.00	Niveau N°2	3.297	Adjonction de MCP	0.713	Isolation intérieure
10	Fenêtres existantes	Sans protection	0.24	Niveau N°1	0.251	Sans adjonction de MCP	0.133	Isolation intérieure
11	Fenêtres existantes	Store opaque	2.00	Niveau N°1	0.251	Sans adjonction de MCP	0.133	Isolation intérieure
12	Fenêtres existantes	Store opaque	0.24	Niveau N°2	0.251	Sans adjonction de MCP	0.133	Isolation intérieure
13	Fenêtres existantes	Store opaque	0.24	Niveau N°1	3.297	Sans adjonction de MCP	0.133	Isolation intérieure
14	Fenêtres existantes	Store opaque	0.24	Niveau N°1	0.251	Adjonction de MCP	0.133	Isolation intérieure
15	Fenêtres existantes	Store opaque	0.24	Niveau N°1	0.251	Sans adjonction de MCP	0.713	Isolation intérieure
16	Fenêtres existantes	Store opaque	0.24	Niveau N°1	0.251	Sans adjonction de MCP	0.133	Isolation extérieure
17	Fenêtres performantes	Sans protection	2.00	Niveau N°1	0.251	Sans adjonction de MCP	0.133	Isolation intérieure
18	Fenêtres performantes	Sans protection	0.24	Niveau N°2	0.251	Sans adjonction de MCP	0.133	Isolation intérieure
19	Fenêtres performantes	Sans protection	0.24	Niveau N°1	3.297	Sans adjonction de MCP	0.133	Isolation intérieure
20	Fenêtres performantes	Sans protection	0.24	Niveau N°1	0.251	Adjonction de MCP	0.133	Isolation intérieure
21	Fenêtres performantes	Sans protection	0.24	Niveau N°1	0.251	Sans adjonction de MCP	0.713	Isolation intérieure
22	Fenêtres performantes	Sans protection	0.24	Niveau N°1	0.251	Sans adjonction de MCP	0.133	Isolation extérieure
23	Fenêtres performantes	Store opaque	2.00	Niveau N°2	0.251	Sans adjonction de MCP	0.133	Isolation intérieure
24	Fenêtres performantes	Store opaque	2.00	Niveau N°1	3.297	Sans adjonction de MCP	0.133	Isolation intérieure
25	Fenêtres performantes	Store opaque	2.00	Niveau N°1	0.251	Adjonction de MCP	0.133	Isolation intérieure
26	Fenêtres performantes	Store opaque	2.00	Niveau N°1	0.251	Sans adjonction de MCP	0.713	Isolation intérieure
27	Fenêtres performantes	Store opaque	2.00	Niveau N°1	0.251	Sans adjonction de MCP	0.133	Isolation extérieure
28	Fenêtres performantes	Store opaque	0.24	Niveau N°2	3.297	Sans adjonction de MCP	0.133	Isolation intérieure
29	Fenêtres performantes	Store opaque	0.24	Niveau N°2	0.251	Adjonction de MCP	0.133	Isolation intérieure
30	Fenêtres performantes	Store opaque	0.24	Niveau N°2	0.251	Sans adjonction de MCP	0.713	Isolation intérieure
31	Fenêtres performantes	Store opaque	0.24	Niveau N°2	0.251	Sans adjonction de MCP	0.133	Isolation extérieure
32	Fenêtres performantes	Store opaque	0.24	Niveau N°1	3.297	Adjonction de MCP	0.133	Isolation intérieure
33	Fenêtres performantes	Store opaque	0.24	Niveau N°1	3.297	Sans adjonction de MCP	0.713	Isolation intérieure
34	Fenêtres performantes	Store opaque	0.24	Niveau N°1	3.297	Sans adjonction de MCP	0.133	Isolation extérieure
35	Fenêtres performantes	Store opaque	0.24	Niveau N°1	0.251	Adjonction de MCP	0.713	Isolation intérieure
36	Fenêtres performantes	Store opaque	0.24	Niveau N°1	0.251	Adjonction de MCP	0.133	Isolation extérieure
37	Fenêtres performantes	Store opaque	0.24	Niveau N°1	0.251	Sans adjonction de MCP	0.713	Isolation extérieure

7.2.4.2. Résultats des plans d'expériences durant la période froide

Les résultats des plans d'expériences sur la maison individuelle sont présentés pour la saison froide en considérant le graphe des effets et les représentations Normal Plot et Half Normal Plot :

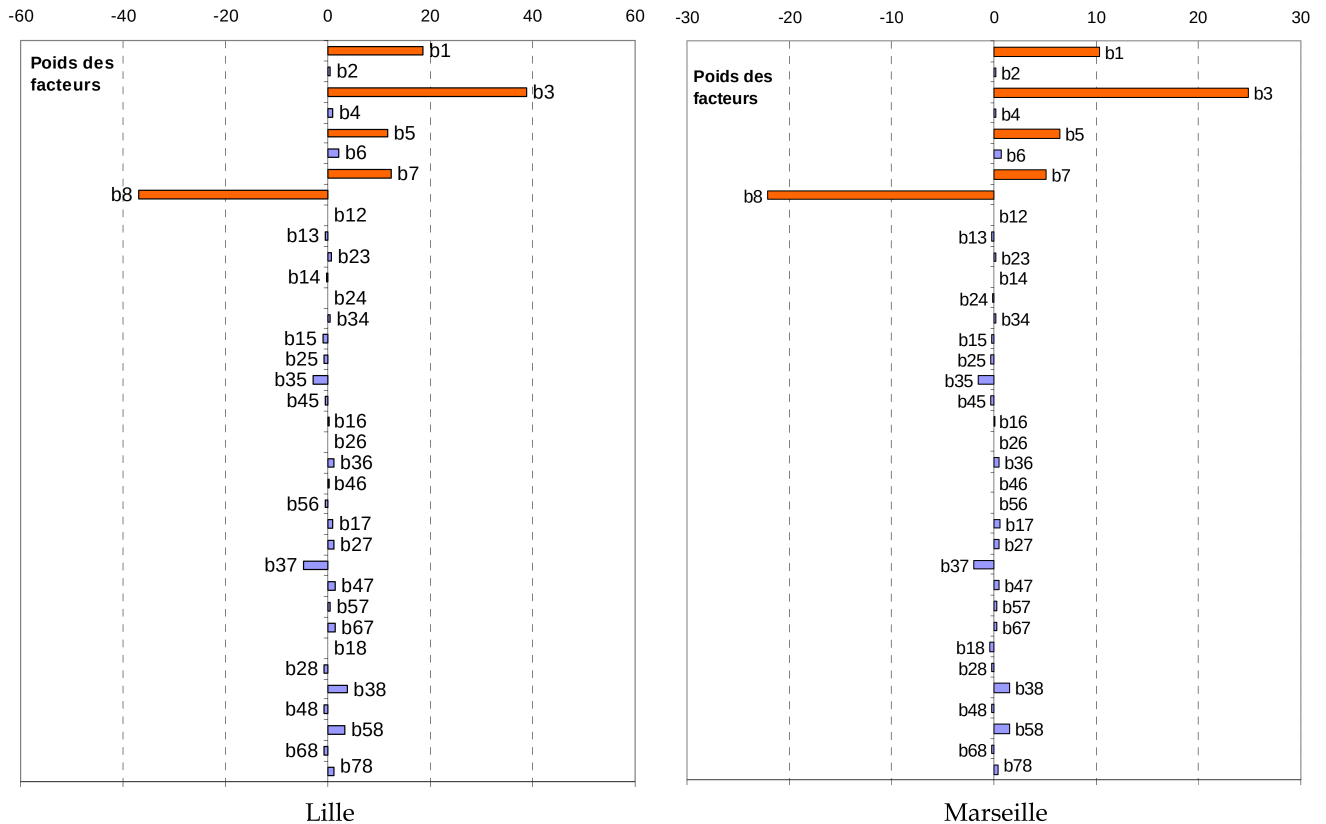


Figure 68. Effets de la réponse « Besoins en chauffage » sur la maison individuelle de 1966

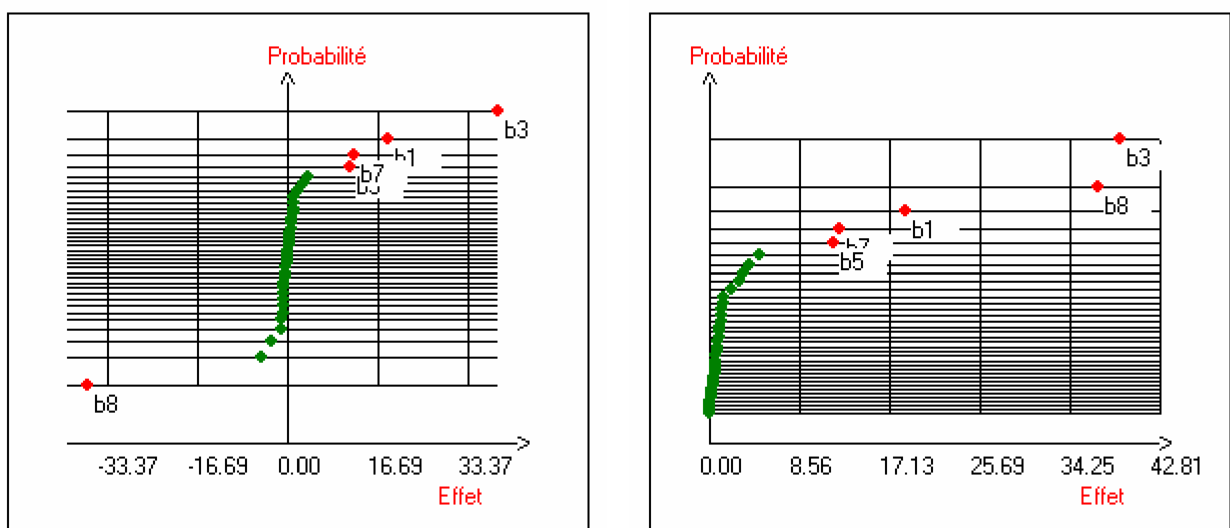


Figure 69. Représentations graphiques Normal Plot (à gauche) et Half Normal Plot (à droite) des effets sur la réponse « Besoins en chauffage » pour la maison individuelle de 1966 à Lille

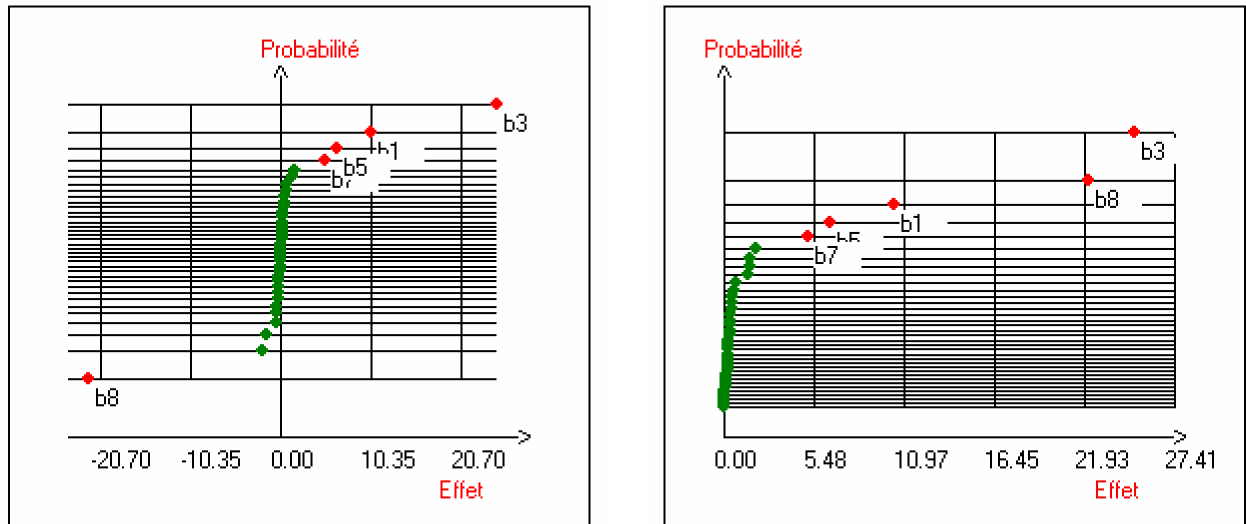


Figure 70. Représentations graphiques Normal Plot (à gauche) et Half Normal Plot (à droite) des effets sur la réponse « Besoins en chauffage » pour la maison individuelle de 1966 à Marseille

Des effets similaires sont obtenus à Lille et à Marseille (avec des poids plus grands à Lille dus à des besoins calculés plus importants). Le graphe des effets des facteurs sur la réponse « Besoins en chauffage » montre une prédominance des effets principaux. Les gains solaires et la ventilation n'ont quasiment pas d'effet (par rapport aux autres facteurs) sur la réponse. L'élément ayant le plus d'effet étant le coefficient de déperditions du mur (la borne supérieure correspond au bâtiment non isolé). Il est suivi par la position de l'isolant (l'isolation extérieure diminuant de façon plus conséquente les besoins).

Il s'ensuit l'amélioration du coefficient de déperditions de la fenêtre. On note ensuite une différence de classement infime (les facteurs ayant quasiment le même poids) entre les deux zones géographiques :

- A Lille, on trouve l'isolation de la toiture suivie de celle du plancher,
- A Marseille, c'est l'inverse.

Les représentations graphiques Normal Plot et Half Normal Plot confirment cette tendance.

7.2.4.3. Résultats des plans d'expériences durant la période chaude sur la maison individuelle

Pour les 37 simulations réalisées pour chacune des météos, l'indice de confort d'été est calculé en juillet et est renseigné sous Nemrod. Les graphes des effets et les représentations graphiques Normal Plot et Half Normal Plot sont présentés sur les figures suivantes. Ils ont suivis de l'analyse des effets d'interaction.

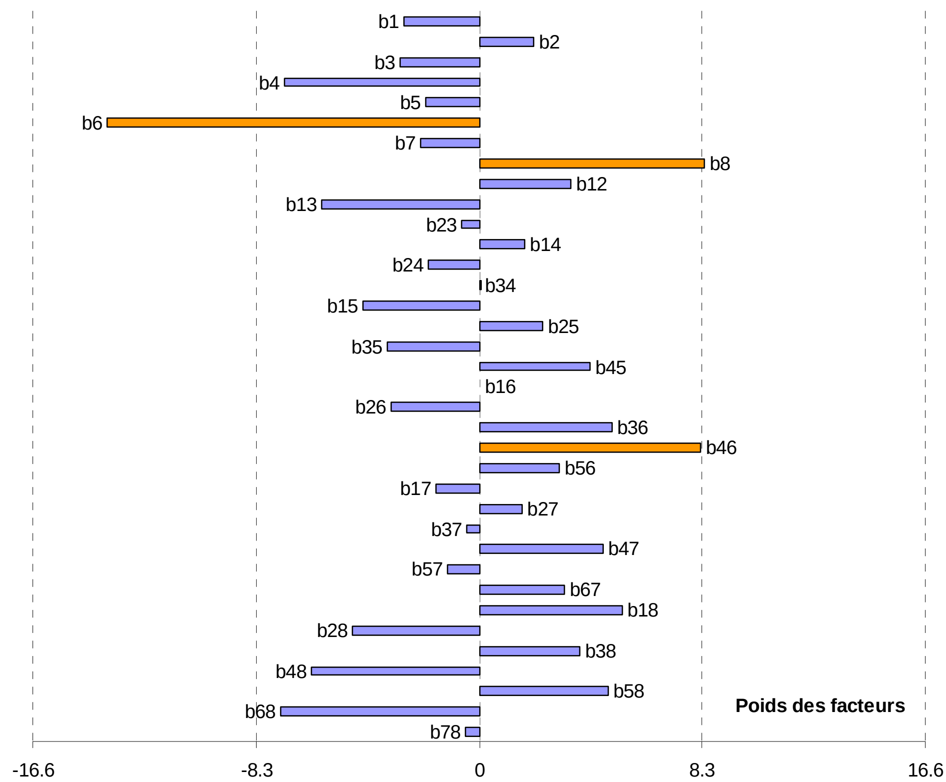


Figure 71. Effets de la réponse « Indice de confort » sur la maison individuelle de 1966 à Lille

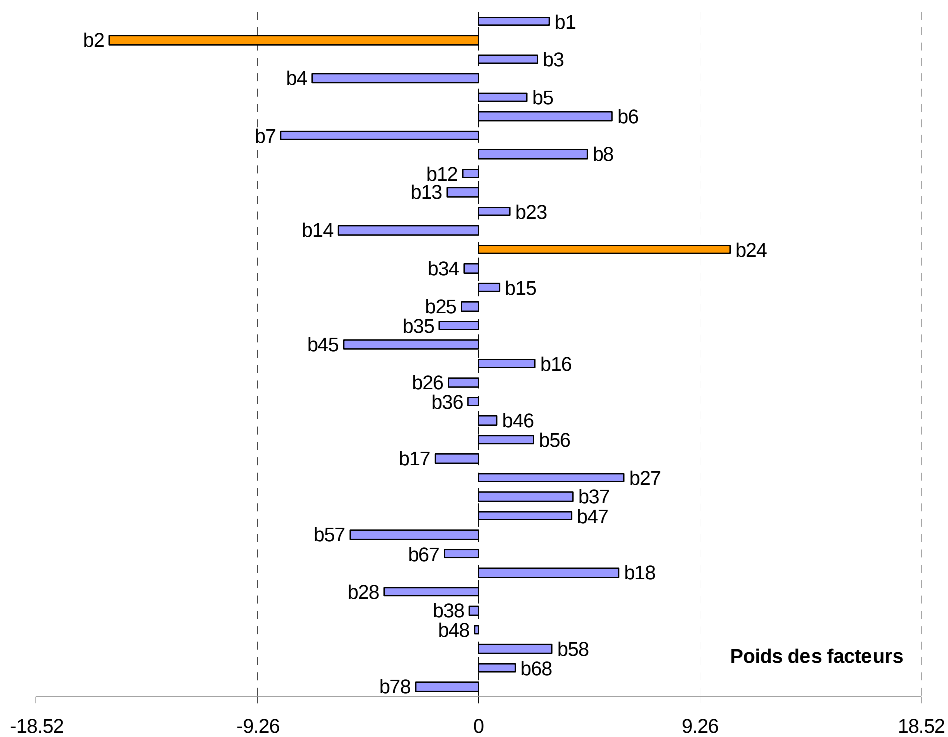


Figure 72. Effets de la réponse « Indice de confort » sur la maison individuelle de 1966 à Marseille

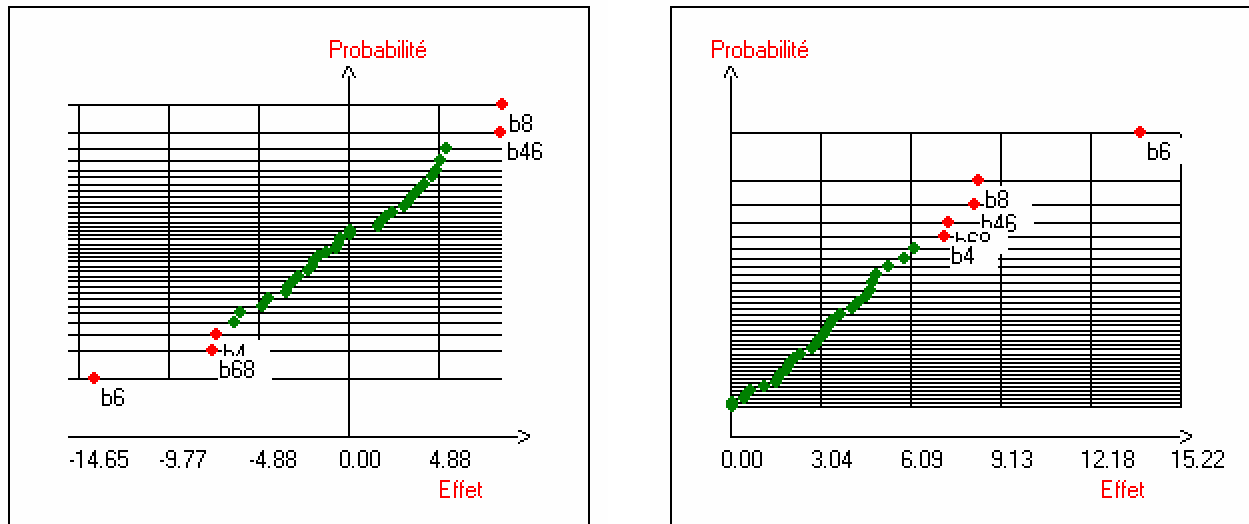


Figure 73. Représentations graphiques Normal Plot (à gauche) et Half Normal Plot (à droite) des effets sur la réponse « Indice de confort d'été » pour la maison individuelle de 1966 à Lille

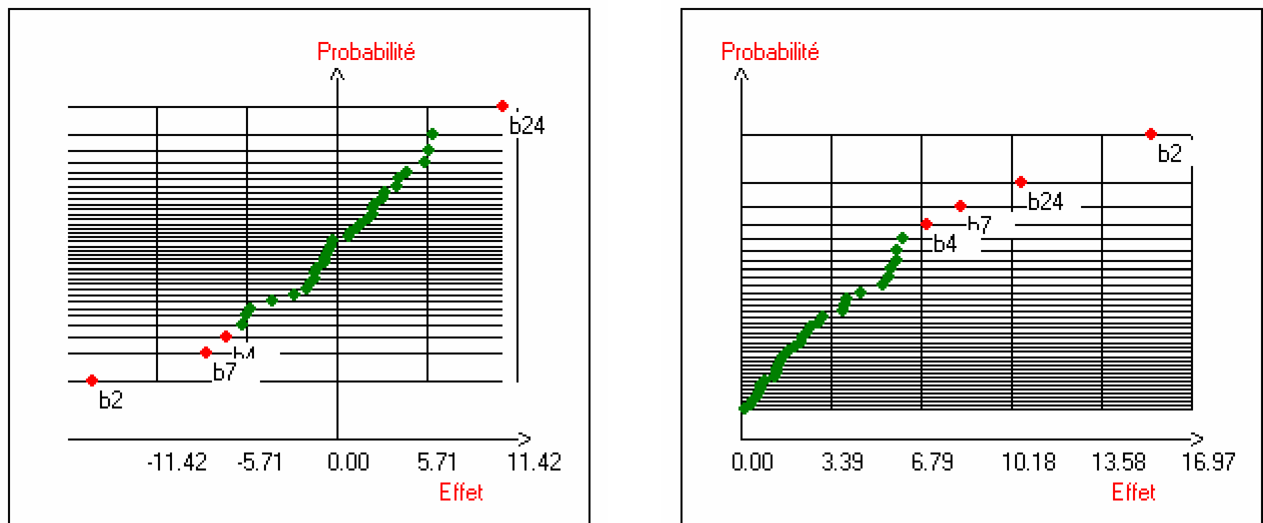


Figure 74. Représentation graphique Normal Plot (à gauche) et Half Normal Plot (à droite) des effets sur la réponse « Indice de confort d'été » pour la maison individuelle de 1966 à Marseille

Les effets des facteurs sur l'indice de confort d'été sont cette fois-ci différents à Lille et à Marseille. Pour chacune des zones géographiques, deux facteurs ont des effets principaux négatifs sur la réponse « Indice de confort d'été » : l'inertie à Lille (l'adjonction de matériaux à changement de phase diminue l'indice de confort) et les gains solaires à Marseille (les fenêtres sans protection solaire dégradent l'indice de confort). Dans les deux zones géographiques, pour augmenter le confort d'été, il vaut mieux : isoler la toiture, limiter les ponts thermiques (coefficient b8) et ne pas appliquer la ventilation nocturne (coefficient b4). Il est important de noter, pour l'analyse de ce dernier coefficient (b4), que les résultats sont fortement dépendants du choix des hypothèses de départ qui consistent à considérer une ouverture des fenêtres la nuit non assujettie à la différence de température entre l'intérieur et l'extérieur du bâtiment. A Lille : installer des fenêtres performantes (coefficient b1), isoler le plancher (coefficient b5) et les murs par l'extérieur (coefficient b3 et b8), ne pas augmenter l'inertie (coefficient b6) ni installer de stores (coefficient b2). A Marseille : installer des stores, isoler la toiture et augmenter l'inertie et ne pas a priori installer des fenêtres performantes ni isoler le plancher et les murs.

Des effets d'interaction sont relevés entre certains facteurs. Ils sont étudiés ci-après :

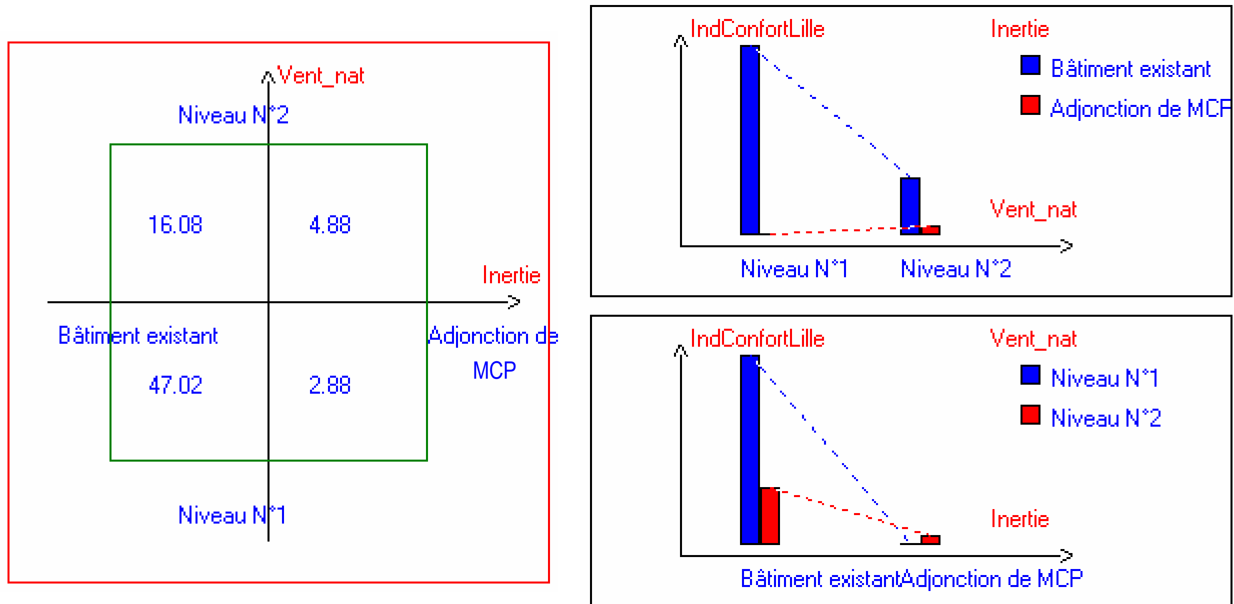


Figure 75. Effets des interactions X4 * X6 sur la réponse « Indice de confort » à Lille sur la maison individuelle

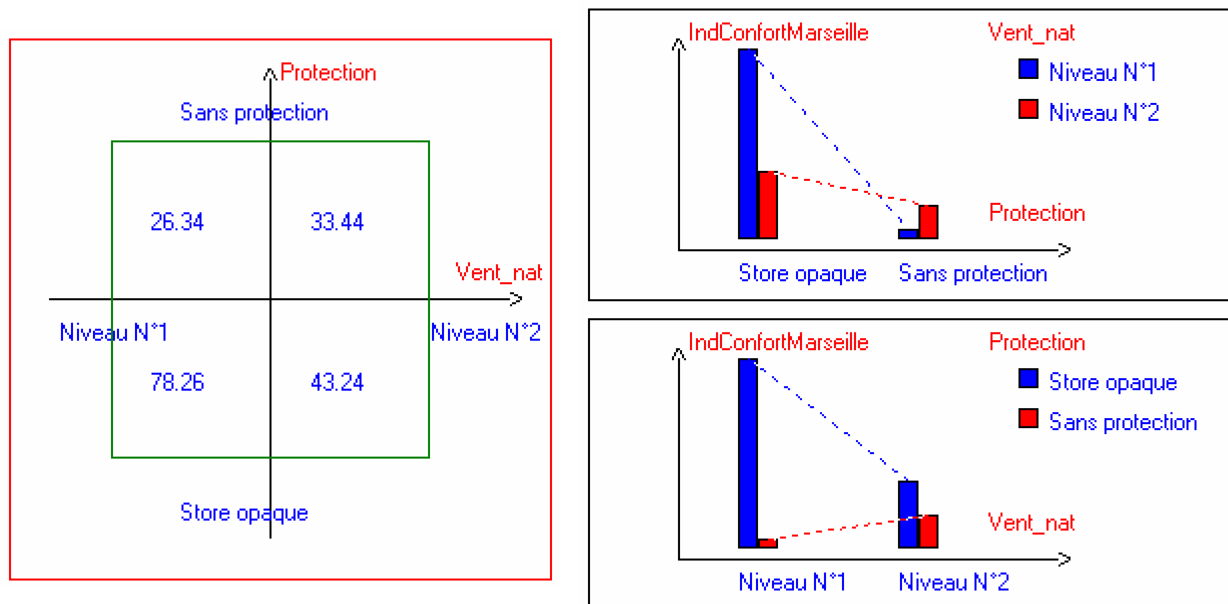


Figure 76. Effets des interactions X2 * X4 sur la réponse « Indice de confort » à Marseille sur la maison individuelle

A Lille, l'adjonction de MCP diminue d'autant plus le confort que la ventilation nocturne n'est pas appliquée (cf. Figure 75). La ventilation nocturne dégrade d'autant plus le confort que le bâtiment n'est pas inerte. Il vaut mieux ne pas appliquer la ventilation nocturne ni augmenter l'inertie[69].

L'étude des interactions à Marseille (cf. Figure 76) montre que l'indice de confort d'été peut être amélioré en diminuant le facteur solaire (par l'installation de stores opaques) d'autant plus que la ventilation nocturne n'est pas appliquée.

69 Notons que ce résultat dépend fortement des hypothèses d'ouverture des fenêtres (si une stratégie de gestion par différence de température entre l'intérieur et l'extérieur était appliquée, il en serait tout autre).

7.2.4.4. Conclusions sur les résultats des plans d'expériences sur la maison individuelle de 1966

Si pour la réponse « Besoins en chauffage », les résultats sont similaires à Lille et à Marseille, quand on s'intéresse à l'amélioration de l'indice de confort d'été, ils diffèrent :

- A Lille, les facteurs diminuant les besoins en chauffage en hiver participent à l'amélioration du confort d'été : l'installation de fenêtres performantes, l'isolation des murs, du plancher et de la toiture et la position de l'isolant.
- A Marseille, l'isolation de la toiture et la position de l'isolant mises à part, la plupart des facteurs réduisant la réponse « Besoins en chauffage » en hiver dégradent l'indice de confort d'été. C'est le cas du renforcement de l'isolation des fenêtres et des murs. Toutefois, l'étude des interactions montre que les effets contradictoires relevés entre les deux saisons peuvent être compensés par l'association adéquate de certains facteurs notamment les protections solaires :
    - o L'adjonction de fenêtres performantes (U=1,5W/m².K) devrait être complétée par l'installation de protections solaires ou l'amélioration de l'inertie :

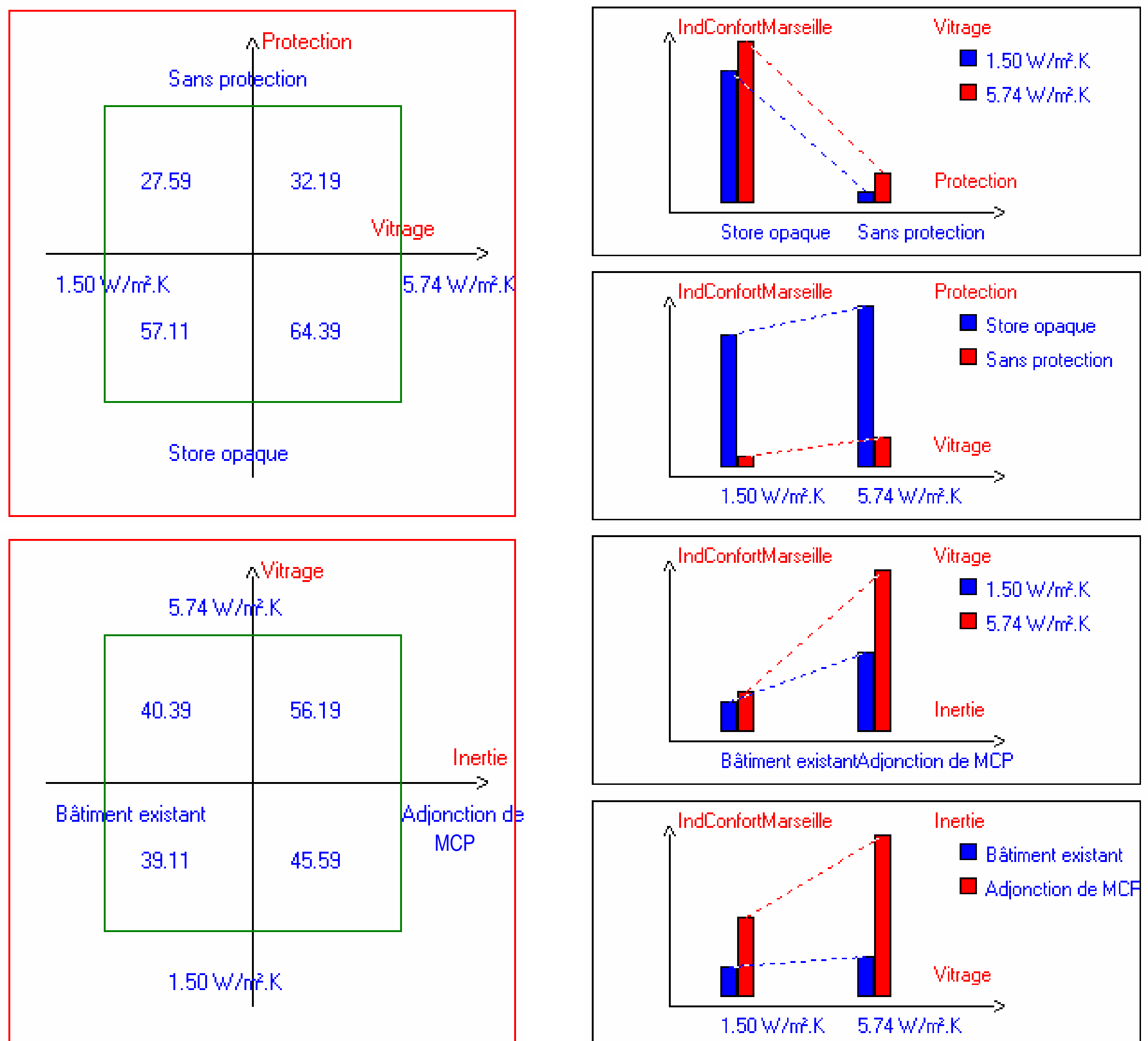


Figure 77. Effets des interactions X2 * X1 et X6 * X1 sur la réponse « Indice de confort » à Marseille sur la maison individuelle

o L'isolation des murs devrait également s'accompagner de l'installation de protections solaires (cf. Figure 78 : interaction gfen/ Umur) :

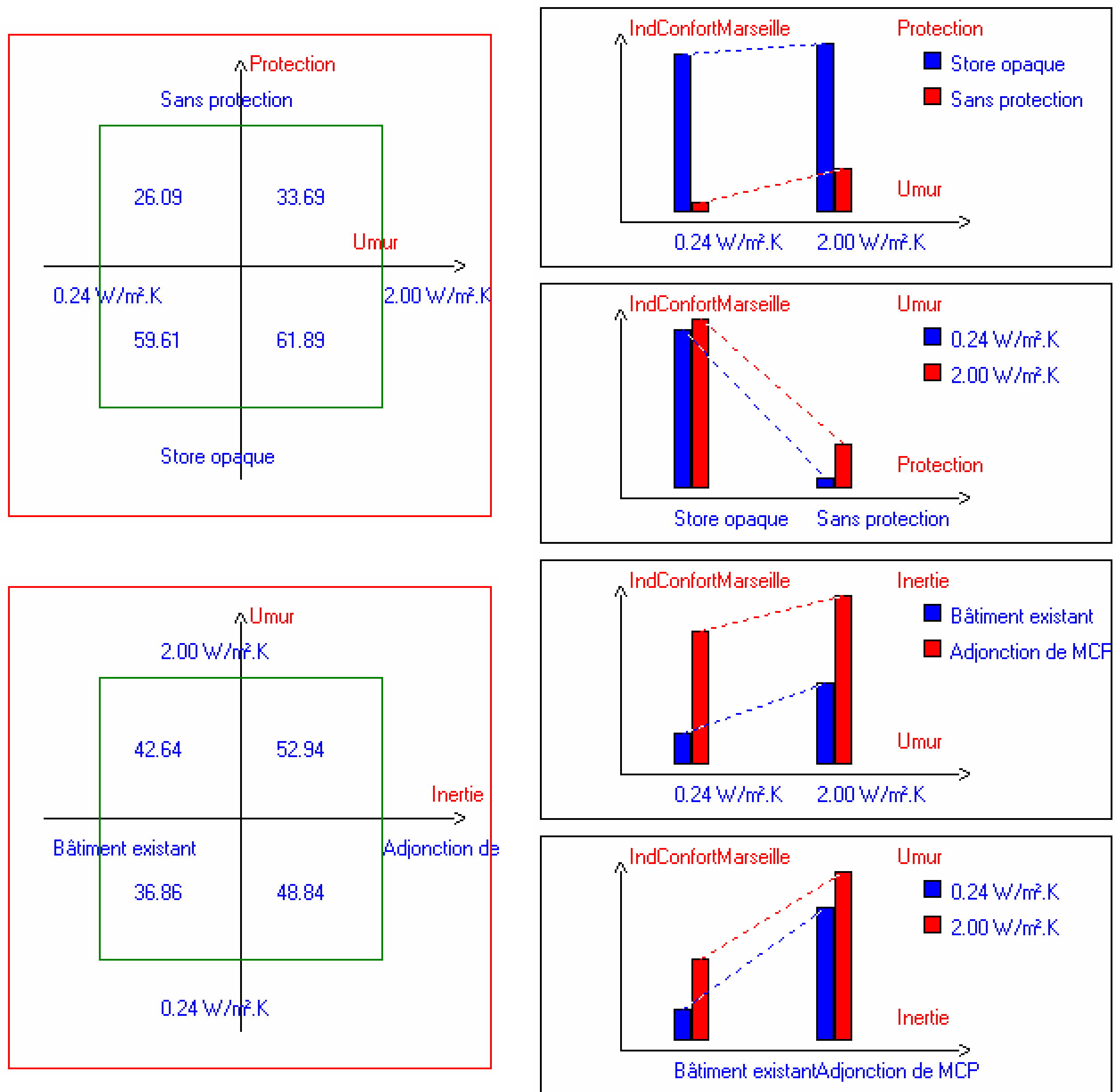


Figure 78. Effets des interactions X2 * X3 et X6 * X3 sur la réponse « Indice de confort » à Marseille sur la maison individuelle

7.2.5. Organigrammes décisionnels de la maison de 1966

Les plans d'expériences ont permis d'apprécier les effets de la variation de l'état des facteurs sur la réduction des besoins en chauffage et l'amélioration de l'indice de confort d'été. L'exploitation de ces résultats aboutit aux organigrammes décisionnels suivants :

7.2.5.1. Maison individuelle située à Lille

Les facteurs ayant le plus d'effet sur les différentes réponses sont intégrés dans l'organigramme décisionnel (Figure 79) :



Figure 79. Organigramme décisionnel de la maison individuelle à Lille

7.2.5.2. Maison individuelle située à Marseille

De la même manière qu'à Lille, les facteurs prépondérants sont classés dans l'organigramme décisionnel (Figure 80). Cette fois-ci, des effets contradictoires sont relevés pour l'isolation du plancher (favorable en hiver et défavorable en été[70]) : cette solution n'est donc pas préconisée comme étant une priorité.

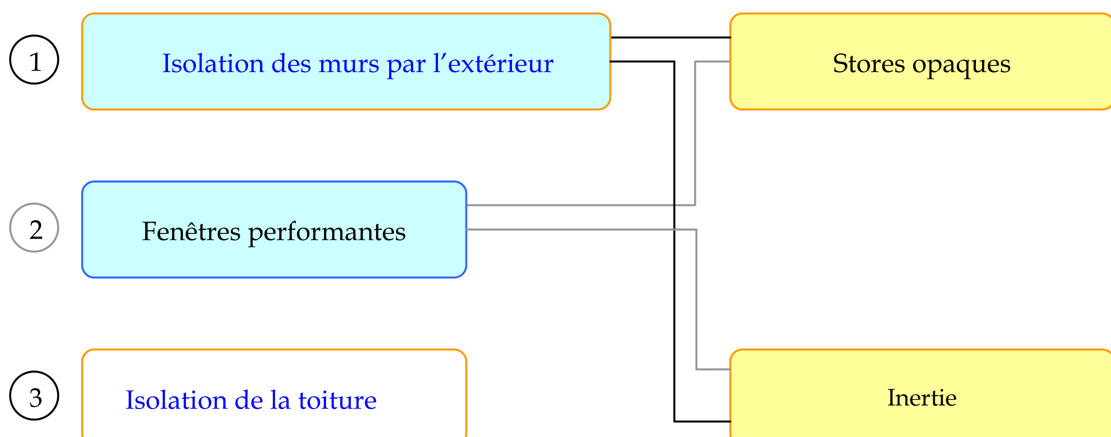


Figure 80. Organigramme décisionnel de la maison individuelle à Marseille

[70] L'isolation du plancher ne permet pas de bénéficier de l'inertie thermique du sol.

7.2.6. Choix expert des dispositifs bioclimatiques intégrables sur la maison individuelle de 1966

En fonction des priorités d'interventions dégagées par les plans d'expériences, nous allons maintenant proposer des solutions bioclimatiques favorisant les stratégies mises en œuvre pour Lille et Marseille.

7.2.6.1. Cas de Lille

Les facteurs identifiés à Lille favorisent la conservation de l'énergie et la captation de l'énergie solaire. Des dispositifs répondent à ces stratégies :

- Les TIM
- La serre.

Les deux solutions identifiées vont être optimisées par la réduction d'une fonction définie dans le § 4.8. Par ailleurs, en terme de ventilation naturelle, la communication (Flory-Celini *et al*, 2007) a montré que la ventilation par le sous-sol suffit (l'inertie du sol de la cave est ainsi exploitée).

7.2.6.2. Cas de Marseille

A Marseille, la principale stratégie identifiée consiste également à conserver la chaleur (notons que l'isolation de la toiture favorise en sus l'amélioration de l'indice de confort d'été), elle devrait être associée au contrôle du rayonnement solaire par l'adjonction de stores opaques et enfin l'amélioration de l'inertie. Les dispositifs identifiés sont les suivants :

- Les TIM
- Les solutions favorisant l'inertie comme le mur capteur accumulateur.

La ventilation nocturne ayant des effets négatifs sur l'indice de confort d'été, il est souhaitable d'intégrer une autre stratégie favorisant la ventilation naturelle durant cette période. Une communication réalisée dans le cadre de Cisbat 2007 (Flory-Celini *et al*, 2007) a consisté à comparer différentes stratégies de ventilation sur l'amélioration du confort d'été (la ventilation nocturne, la ventilation par le sous-sol ou encore l'échangeur air / sol communément appelé puits canadien ou provençal). La ventilation nocturne et celle par le sous-sol ont été modélisées en utilisant TRNFLOW. L'intégration du puits canadien a été réalisée par le biais de l'interface PuiCana développée au CETHIL qui simplifie l'utilisation du Type 460 de Hollmuller (Hollmuller, 2002)[71].

Les caractéristiques du puits canadiens obtenues par optimisation dans Puicana (basé sur les règles du pouce) sont décrites sur la Figure 81.

71 Ces solutions sont présentées en annexe.

quinconces impaires
en lignes
quinconces paires
Enrobage
pas d'enrobage
Argile
Argilo-limoneux
Limons
Sablo-limoneux
Sable
Aide au choix des sols
OK
Annuler
Tuyaux
les tuyaux sont disposés en lignes
Diamètres extérieur 200 [mm]
Materiau : PVC
Tous les tuyaux du fichier auront les mêmes propriétés de materiau
Nombre de couches : 1
Espacement des centres des couches : 1 [m]
(dans le cas quinconce : espacement entre les centres d'une même ligne, donc deux espacements de ligne)
Profondeur du premier tuyau : [m](exterieur du tuyau/haut du sol) 1
Horizontalement
Nombre tuyaux par couche : 1
Espacement des centres des tuyaux : 1 [m]
(dans le cas quinconce : espacement horizontal entre les tuyaux d'une même couche.)
Enrobage
pas d'enrobage
distance exterieur du tuyaux/haut de l'enrobage : 0,7 [m]
lier, delier
distance exterieur du tuyaux/bas de l'enrobage : 0,6 [m]
distance exterieur du tuyaux/droite de l'enrobage : 0,71 [m]
lier, delier
distance exterieur du tuyaux/gauche de l'enrobage : 0,71 [m]
Dimension et position de la zone
Taille en X : 1,62 [m]
Taille en Y : 20 [m]
Taille en Z : 1,5 [m]
Distance X au coin gauche du terrain: 2,71 [m]
Distance Y au coin gauche du terrain: 3 [m]
Distance Z au coin gauche du terrain: 0,3 [m]

Figure 81. Caractéristiques du puits canadien retenu

Pour Marseille, les résultats suivants sont obtenus :

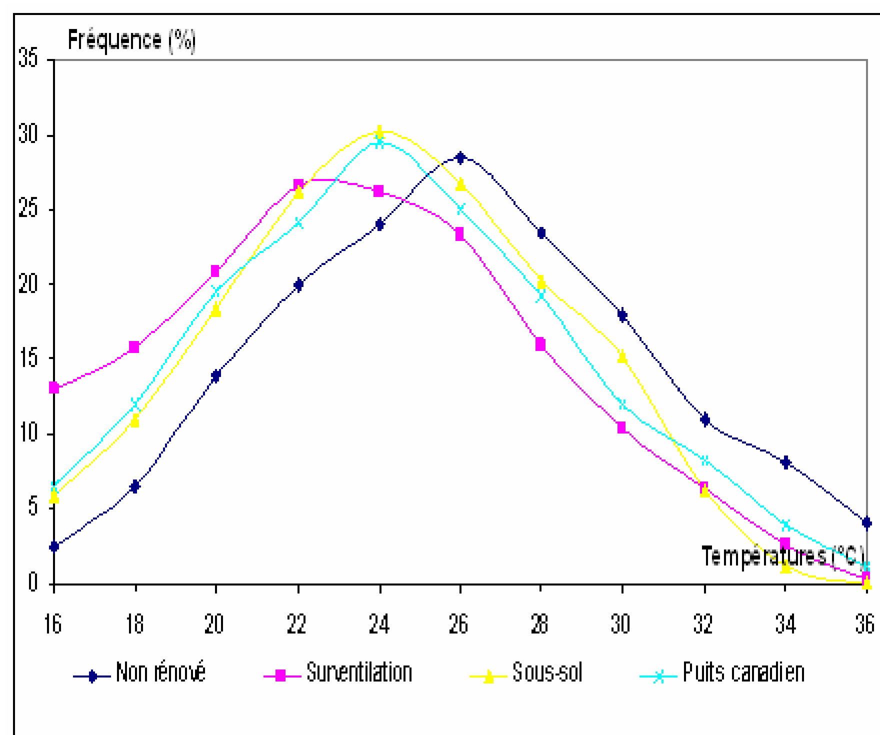


Figure 82. Fréquence des températures à Marseille pour un bâtiment non isolé

Dans le cadre de cette communication, nous avons montré que le choix de la stratégie de ventilation naturelle dépendait des performances thermiques du bâtiment (bâtiment isolé ou pas). Pour l'édifice considéré, la ventilation par le sous-sol semblait convenir pour un bâtiment non isolé et par l'échangeur air / sol pour un bâtiment isolé. Les préconisations d'hiver préconisant l'isolation, nous retenons le puits canadien pour le comparatif de solutions.

7.2.7. Optimisation des solutions bioclimatiques sur la maison individuelle de 1966

La méthode d'optimisation a été présentée au § 4.8.3. Sur la maison de 1966, les solutions retenues sont dimensionnées par cette méthode pour les météos de Lille et de Marseille. Les plans d'expériences ont montrés que certains facteurs étaient défavorables pour les réponses. C'est par exemple le cas de l'inertie à Lille et du facteur solaire à Marseille. L'homme d'études se doit d'intégrer ces résultats dans le choix des solutions bioclimatiques étudiées. Pour ce faire, la serre ne sera étudiée qu'à Lille (l'état de l'art ayant montré que ce dispositif favorise le captage et par conséquent le facteur solaire) et le mur capteur accumulateur à Marseille (solution répondant au stockage de la chaleur).

7.2.7.1. Optimisation du dimensionnement de la serre

Notons que nous avons choisi d'intégrer la serre au niveau du séjour, qui disposait d'un balcon, sur la hauteur du séjour. Dans l'annexe, cette technologie est présentée sous le nom de balcon vitré. Ce choix est poussé par des raisons pratiques (par le fait notamment que certaines configurations associent ce dispositif à l'installation de matériau d'isolation transparent sur les murs extérieurs). Ceci étant, cette installation, selon la littérature n'est pas la plus favorable. Comme montré en annexe, la typologie qui semble être la plus intéressante est celle qui consiste à installer la serre sur l'intégralité des parois situées au sud. Il y est également montré que TRNSYS n'accorde que le Sud comme possibilité d'installation de la serre : c'est au niveau de cette orientation que « le balcon vitré » est installé. Au niveau du Type 56, la connexion est réalisée par le biais d'entrées de type condition aux limites, notamment le débit d'air échangé entre la serre et le séjour, la température et le flux de chaleur.

Plusieurs paramètres définissent le dimensionnement de la serre, comme indiqué dans l'annexe et certains sont rappelés ci-après :

- le débit d'air entrant dans la serre (kg/h)
- la longueur de la serre (de 0 à 5m)
- la résistance R du vitrage qui varie de 0,17 (simple vitrage) à 0,67 m².K/W (double vitrage Low E + Argon).

Les paramètres suivants ne sont pas optimisés : l'épaisseur du mur située dans la serre (que l'on supposera fixe[72] car le mur Trombe est traitée par ailleurs) et la largeur de la serre

[72] Cloison adjacente à la surface verticale sud de la maison

(difficilement flexible car en interaction directe avec le Type 56 par des conditions aux limites). En effet, la façade adjacente à la serre à une surface fixe sur laquelle on impose le flux, la température et le débit provenant de la serre. En outre, le type du bâtiment ne peut être optimisé directement par TRNOpt, car il n'est pas considéré comme un système. De même, la hauteur de la serre est fixe car correspondant à celle de la surface adjacente.

L'interface obtenue après optimisation est présentée sur la Figure 83. Nous avons fait varier les valeurs initiales des différents paramètres et les résultats obtenus sont synthétisés sur la Figure 84.

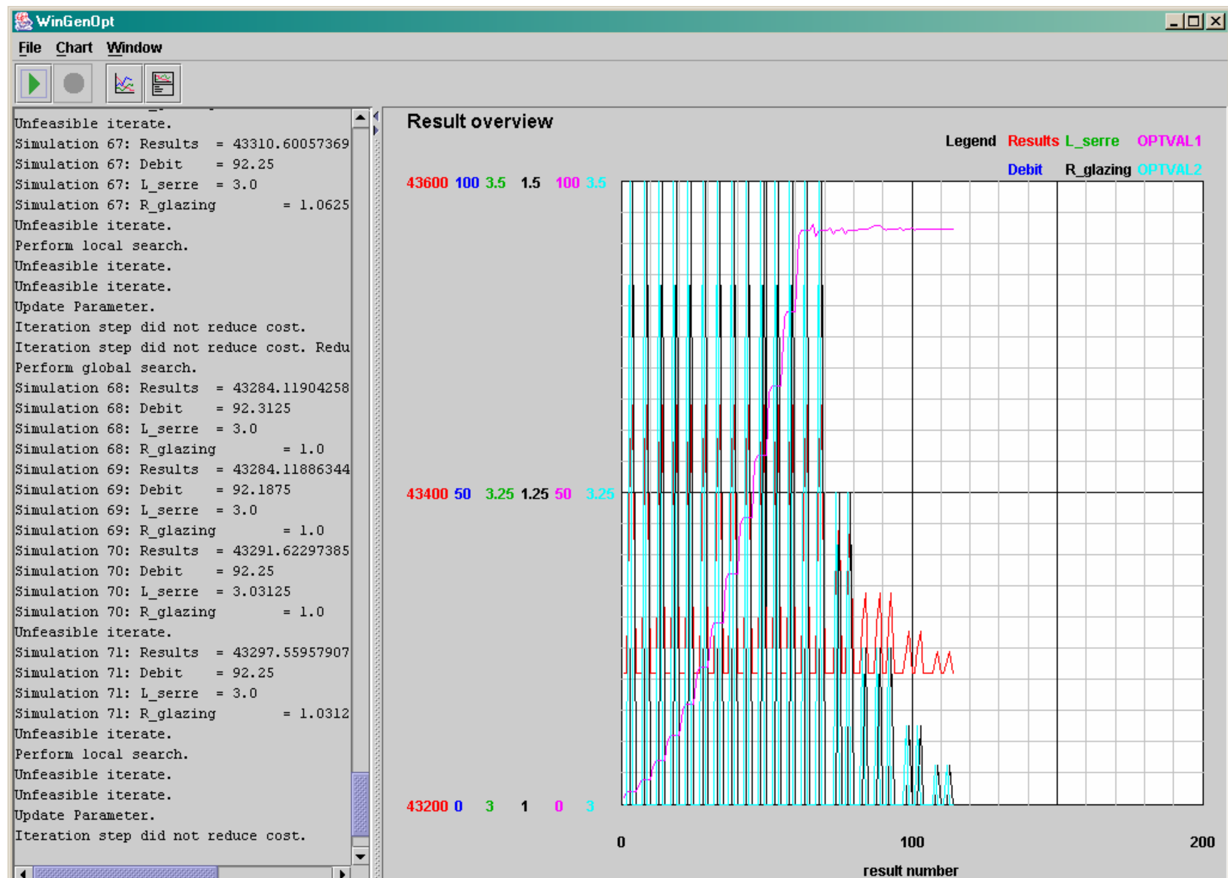


Figure 83. Optimisation par GenOpt de la serre sur la maison individuelle à Lille pour une valeur initiale de paramètres

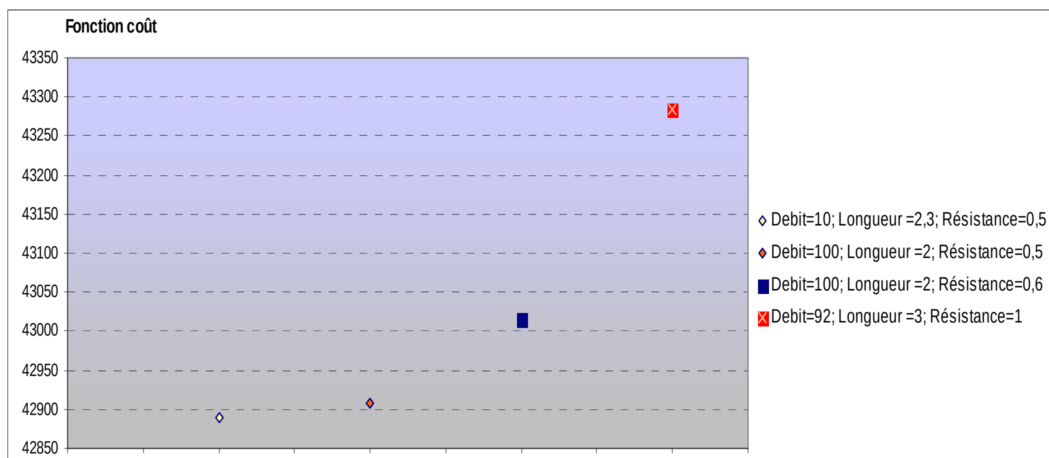


Figure 84. Optimisation de la serre sur la maison individuelle à Lille

La solution retenue est celle qui minimise la fonction coût : débit de 10 kg/h longueur de 2,3 m et une résistance de vitrage de 0,5 m².K/W.

7.2.7.2. Optimisation du dimensionnement du mur capteur accumulateur

L'installation du mur capteur accumulateur s'effectue de façon similaire à la serre au niveau du séjour. La façade du séjour comprenant deux fenêtres, est entièrement remplacée par le mur capteur accumulateur. Les conditions aux limites correspondent également à la température, au débit et au flux de chaleur provenant du mur capteur accumulateur.

Le même Type décrit le mur capteur et le mur Trombe dans TRNSYS. Ce qui diffère est la définition de la fonction de contrôle qui est nulle (pas de circulation d'air) dans le cas du mur capteur. Le Type 36 :'*Thermal Storage Wall*' décrit ce phénomène en offrant quatre modes opératoires par la définition de la fonction de contrôle γ qui détermine le débit d'air souhaité et la façon dont l'air circule. Le premier mode est retenu : le rayonnement solaire total et la transmission du vitrage sont des entrées comme le débit d'air de la lame. Le dimensionnement du mur Trombe s'effectue par le biais des paramètres suivants[73] :

- l'épaisseur du mur (variant de 0,1 à 0,5m)
- la longueur de la lame d'air entre le vitrage et le mur (de 0 à 5m)
- le coefficient d'absorption du mur (variant de 0,1 à 0,95).

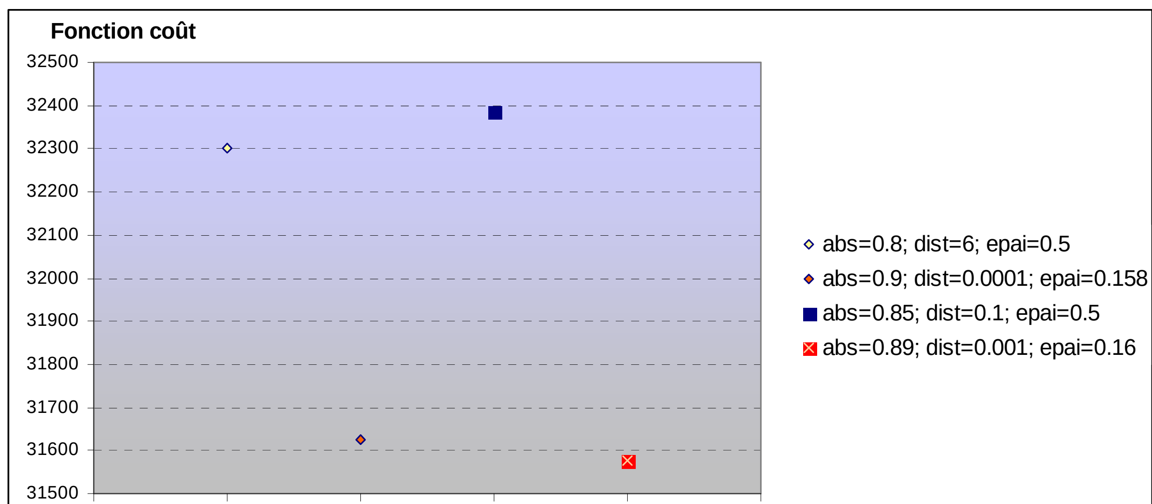


Figure 85. Optimisation du mur capteur accumulateur sur la maison individuelle à Marseille

Les performances du mur capteur accumulateur (installé uniquement sur le séjour) optimisé ont été comparées à celles de l'adjonction de MCP (installé dans les cloisons légères), et c'est cette dernière solution qui procure les meilleurs résultats dans notre cas d'étude (22020 kWh en besoins de refroidissement et de chauffage, contre un peu moins de 31600 pour le mur capteur accumulateur optimisé). L'adjonction de MCP est donc retenue pour la prochaine étape qui consiste à compare les différentes solutions.

[73] Notons qu'une optimisation intégrant le débit et le facteur solaire du vitrage en plus des paramètres précités a été réalisée. Ces éléments sont définis comme des entrées dans le Type 36. En lançant GenOpt, même si les simulations sont lancées, le logiciel n'incrémente pas les valeurs de ces données.

7.2.7.3. Optimisation du dimensionnement de l'isolation transparente

Les mêmes paramètres d'optimisation que pour le logement collectif sont retenus.

A Lille et à Marseille, l'optimisation a été réalisée en moins de deux heures et les résultats suivants sont obtenus : g=0,65 et U=0,6 W/m².K. Ces valeurs correspondent au « Cast glass elements ».



Figure 86. Exemple de bâtiment avec des matériaux d'isolation transparents (Envirobat, 2007)

7.2.8. Comparaison des solutions bioclimatiques sur une maison individuelle construite en 1966

Les solutions sont comparées et les résultats sont présentés sur la Figure 87 et la Figure 88. Dans les deux zones géographiques, les dispositifs favorisant le meilleur compromis sont : l'installation de fenêtres performantes (FP), de matériaux à isolation transparents (TIM) et l'isolation de la toiture, associés à Lille à l'isolation du plancher, tandis qu'à Marseille ces solutions sont combinées à l'installation de stores opaques ou encore d'un puits canadien (VN).

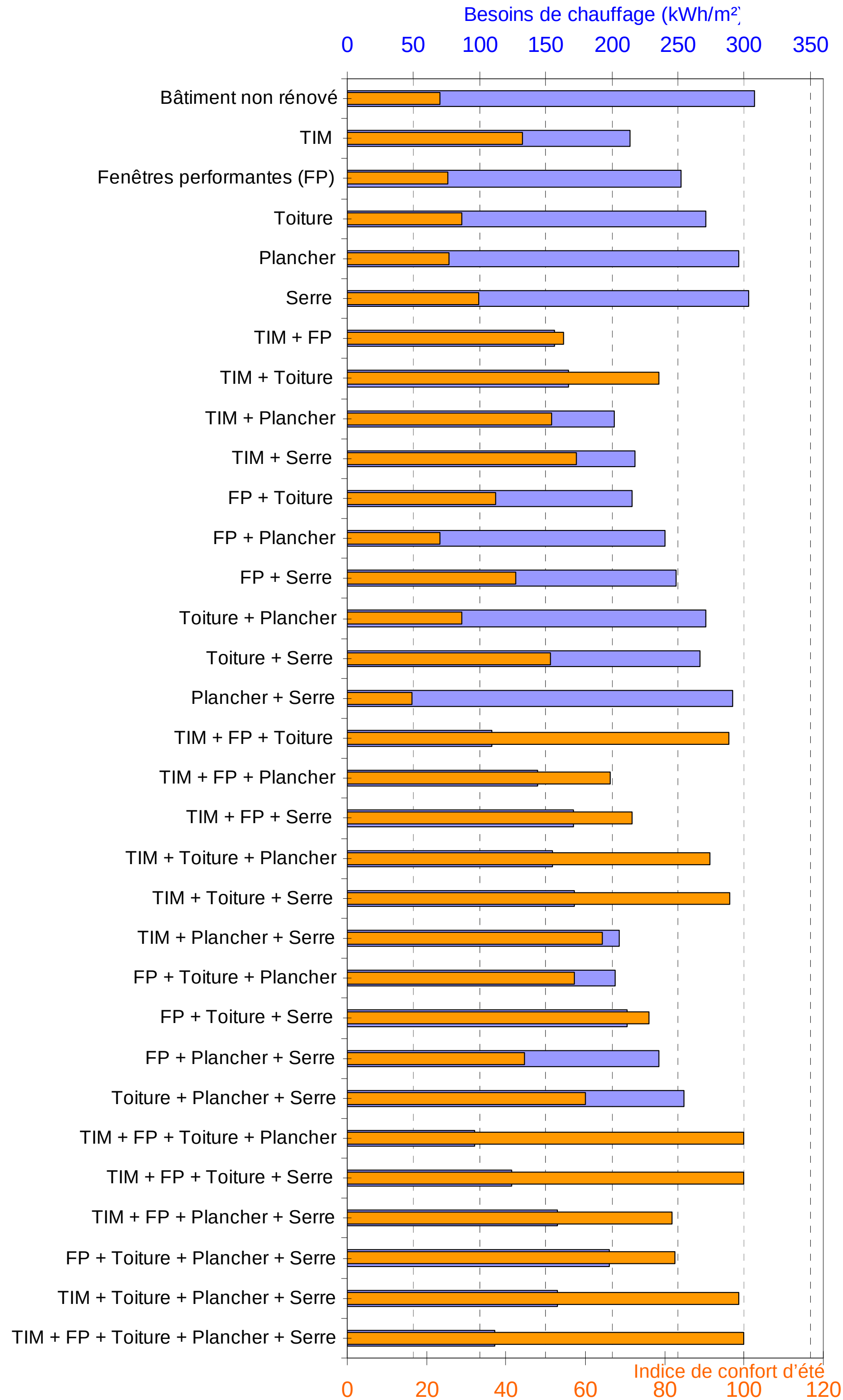


Figure 87. Comparaison des différentes solutions pour la maison individuelle située à Lille

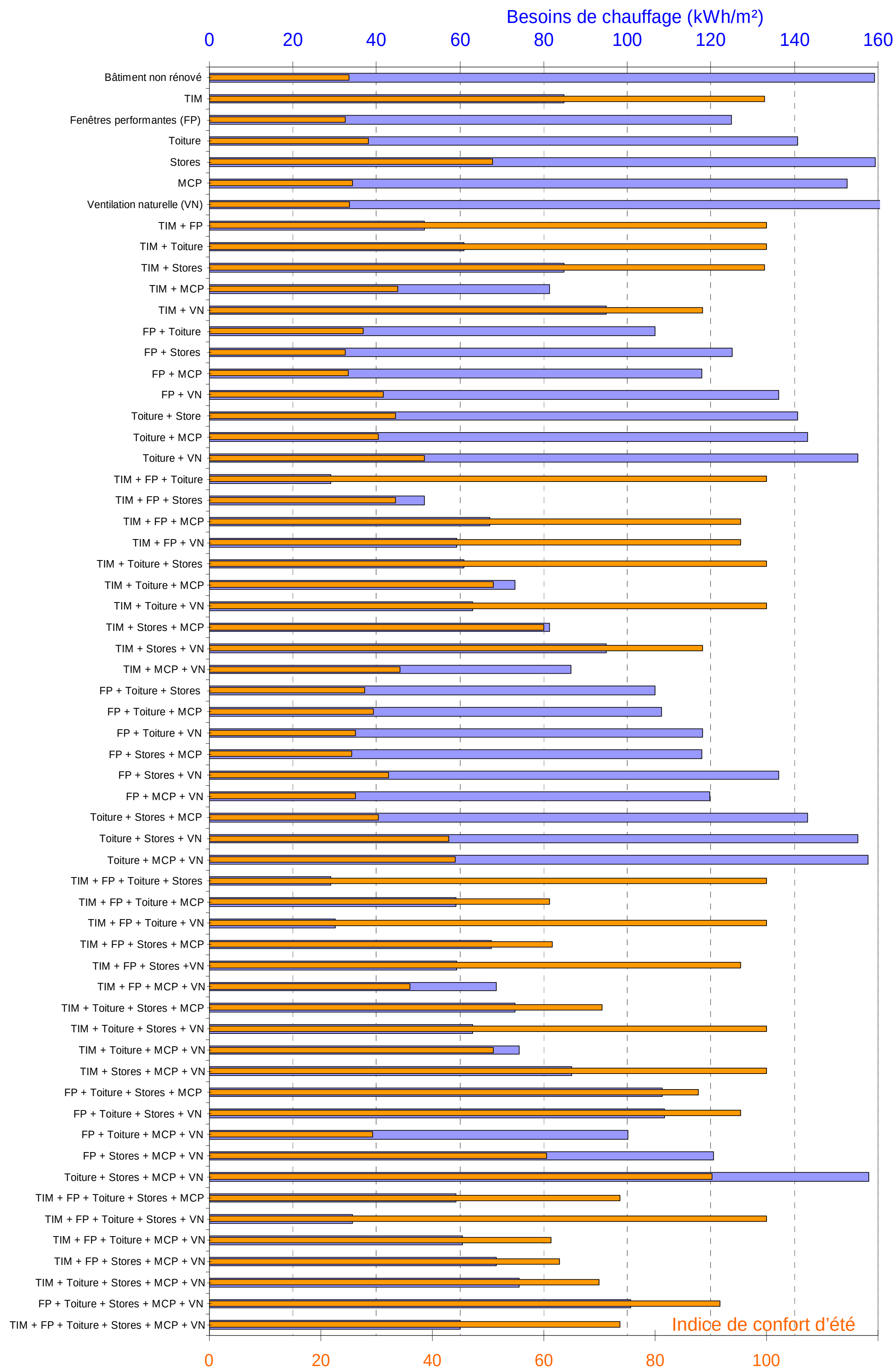


Figure 88. Comparaison des différentes solutions pour la maison individuelle située à Marseille

7.3. Conclusions sur les applications de la méthodologie

La méthodologie MEXPER a été appliquée sur deux bâtiments de référence : un logement collectif de 1900 situé en milieu urbain et une maison individuelle d'après-guerre en milieu rural. Pour chacun de ces bâtiments, deux zones géographiques ont été considérées : Lille et Marseille.

Les bâtiments ont été modélisés grâce aux caractéristiques des parois glanées dans la littérature spécifique. La grande différence dans leur modélisation réside dans la prise en compte des coefficients de pression issus de tables pour la maison individuelle et calculés par un logiciel spécifique (qui considère la densité urbaine, la géométrie du bâtiment et sa hauteur) pour le logement collectif, de façon à mieux intégrer la stratégie de ventilation naturelle.

Que ce soit sur la maison individuelle ou sur le logement collectif, on note deux grandes tendances en fonction de la zone géographique : dans le Nord de la France, les besoins en chauffage sont plus conséquents tandis que dans la zone méditerranéenne, c'est le confort d'été qui constitue une priorité (ceci étant d'autant plus marqué sur le logement collectif).

La définition des niveaux des plans d'expériences est plus délicate de même que le choix des facteurs. A titre anecdotique, plusieurs facteurs ont été testés dans une première approche telle que le coefficient d'absorption des murs ou encore l'humidité (prise en compte au niveau de TRNSYS dans l'expression du confort). Des effets limités ont été relevés. L'interprétation des résultats nécessite la maîtrise par l'homme d'études des phénomènes physiques en présence (la complexité se situe surtout au niveau de l'analyse des effets d'interaction). A cet effet, la synthèse réalisée sur les stratégies bioclimatiques peut être d'un grand recours, car elle a l'avantage de recenser les phénomènes mis en jeu dans un édifice et de présenter les interactions qui peuvent exister dans ce dernier (Flory-Celini, 2008).

Différents plans ont été testés. Les plans de Hadamard, qui ont permis d'effectuer le criblage des facteurs. Puis deux autres plans qui nécessitent un plus grand nombre d'expériences : les plans de Rechtschaffner sur la maison individuelle et les plans factoriels complets sur le logement collectif. Ces derniers plans, même s'ils nécessitent un plus grand nombre de simulations ont l'avantage d'analyser tous les effets d'interaction : l'analyse des résultats est alors plus aisée. L'enjeu étant de trouver un bon compromis entre la durée de l'étude et la précision des résultats.

Les facteurs favorisant la diminution des besoins de chauffage sont dans certains cas (notamment à Marseille) préjudiciables pour l'amélioration du confort d'été. En revanche d'autres facteurs (protection solaire, ventilation naturelle, inertie) peuvent l'améliorer. L'interaction de ces facteurs (ceux favorisant la réduction des besoins de chauffage et ceux améliorant le confort d'été) a des conséquences sur le confort. Ceci oblige à considérer dans les préconisations l'application simultanée de ces deux stratégies en associant ces différents éléments.

Les facteurs prépondérants des plans d'expériences dictent la réalisation des organigrammes décisionnels. Des priorités différentes ont été trouvées selon l'indicateur étudié. pour ce faire, nous avons distingué les solutions qui favorisent la réduction des besoins en chauffage, celles qui améliorent le confort d'été ou encore celles qui constituent un bon compromis entre ces deux indicateurs pour chaque bâtiment et chaque zone géographique :

- A Lille : l'installation de fenêtres performantes répond aux contraintes d'hiver et d'été pour la maison individuelle et le logement collectif (même si pour ce dernier, elle doit être associée à des stratégies de froid : ventilation naturelle et inertie)
- A Marseille, en revanche, les solutions favorisant la réduction des besoins en chauffage (fenêtres performantes, TIM) devraient systématiquement s'accompagner de dispositifs adéquats tels que les protections solaires et l'inertie (solutions récurrentes sur le logement collectif et la maison individuelle).

L'identification des solutions climatiques a été réalisée sur la maison individuelle : les TIM à Lille et à Marseille, la serre à Lille, les solutions favorisant l'inertie et le puits canadien à Marseille. Le dimensionnement des TIM, de la serre et du mur capteur accumulateur a été effectué par l'outil d'optimisation.

Une isolation classique a été installée pour modéliser l'amélioration des performances thermiques de la toiture. Une perspective intéressante consisterait à étudier les effets d'une toiture végétalisée sur l'amélioration des indicateurs retenus.

Enfin, les différentes solutions ont été comparées. Le choix de ces solutions repose sur une analyse visuelle des graphiques (solutions réduisant au mieux les besoins en chauffage tout en favorisant l'amélioration de l'indice de confort d'été). Celles qui semblent constituer un bon compromis sont les suivantes :

- pour le logement collectif : l'installation de fenêtres performantes et de matériaux à isolation transparents associés à la ventilation naturelle à Lille,, tandis qu'à Marseille c'est la même combinaison qu'à Lille à laquelle on adjoint des stores opaques ou encore des MCP
- pour la maison individuelle : l'installation de fenêtres performantes, de matériaux à isolation transparents et l'isolation de la toiture, associés à Lille à l'isolation du plancher, tandis qu'à Marseille à l'installation de stores opaques ou encore d'un puits canadien.

Les premiers jalons d'une méthode de diagnostic basée sur une méthodologie mathématique permettant de réaliser un organigramme décisionnel en terme de confort en été et besoins de chauffage en hiver sont posés.

En fonction des réponses étudiées (besoins en chauffage et indice de confort d'été), les plans d'expériences donnent les priorités d'interventions. Quand on souhaite « agréger » les réponses pour tenter de trouver un compromis entre les solutions d'hiver et d'été, on est confronté au choix du critère. Par ailleurs, si l'on souhaite comparer d'autres indicateurs, la lecture graphique peut être rédhibitoire. Face à ce type de situation, (Roy *et al*, 1993), proposent trois approches opérationnelles pour l'agrégation des performances :

- le critère unique de synthèse,
- le sur classement de synthèse,
- le jugement local interactif avec itérations.

Ce dernier critère met en général en jeu une action ou un petit nombre d'actions qu'il paraît judicieux et pertinent de chercher à comparer parce qu'elles sont voisines. Les solutions considérées apportant des réponses différentes et dans certains cas antagonistes, ce critère est écarté.

Le critère unique de synthèse prend appui sur une règle apportant une réponse synthétique exhaustive et définitive au problème de l'agrégation des performances. Même si cette approche semble simple, (Roy *et al*, 1993) notent que la complexité des résultats théoriques, jointe à la pauvreté des résultats concernant divers problèmes importants auxquels se trouve confronté le praticien, poussent à souligner le caractère trompeur de cette apparente facilité.

L'approche par surclassement de synthèse, qui prend appui sur une règle apportant une réponse synthétique, prend la forme d'un ensemble de conditions conduisant à accepter ou à rejeter un surclassement au niveau global. En revanche, elle est intéressante si elle intègre un certain nombre de critères antagonistes. Cette approche est donc celle qui convient le mieux à notre problématique. Elle nécessite, pour être pertinente, des critères supplémentaires à ceux des plans d'expériences. L'ajout de critères a par ailleurs l'avantage de répondre à des exigences qui « parlent » au décideur, notamment les aspects économiques et environnementaux. Cette approche est décrite dans la partie 8.

8. PERSPECTIVES : NOMBRE DE CRITERES IMPORTANTS ?

Comme souligné dans la conclusion de la partie précédente, quand l'homme d'études souhaite comparer les indicateurs ou encore en intégrer un nombre plus important, il se trouve confronté aux limites des plans d'expériences. Ceci étant, la littérature lui propose plusieurs méthodes de comparaison d'indicateurs. Nous en avons retenu une : c'est l'analyse multicritères par l'approche de surclassement de synthèse.

Dans la démarche intellectuelle de cette analyse, il est nécessaire d'identifier les actions efficaces : les plans d'expériences peuvent alors constituer un outil satisfaisant cette étape. A cet effet, nous avons développé un outil d'aide à la décision : REFLEX-Bio, qui intègre des solutions bioclimatiques et dont les actions efficaces (en terme d'efficacité énergétique) sont déterminées par la méthodologie MEXPER.

8.1. Introduction

Initialement les solutions classiques et durables ont été testées. Vu la redondance avec l'outil développé par EDF R&D, REFLEX (cf. 2.1), il a semblé pertinent de se focaliser sur les solutions bioclimatiques. Ceci étant, dans la méthodologie proposée, l'homme d'études aura loisir d'intégrer toutes les solutions qui lui semblent appropriées.

Les plans d'expériences ont permis de donner les priorités de rénovation en terme énergétique et de confort. Ces deux approches sont maintenant complétées par l'intégration d'autres critères : économique, environnemental, besoins en refroidissement, qualité de l'air et nuisance des travaux. C'est maintenant au décideur de réaliser son choix grâce à la méthode d'aide à la décision.

Nous avons développé un outil Reflex-Bio, avec le soutien de M. Pasanisi au sein d'EDF R&D, qui utilise les simulations dictées par les plans d'expériences et donne une vue globale sur les performances des solutions retenues. Ce dernier outil utilise d'autres indicateurs comme la concentration en CO_2 de l'air, le coût de l'opération, la qualité environnementale de l'opération et la nuisance des travaux. Les critères d'évaluation sont alors comparés parmi les critères précités. L'étape ultime est la réalisation d'un outil d'aide au choix des différentes solutions prioritaires à mettre en œuvre par le biais de l'analyse multicritères.

La structure de l'outil créé est basée sur celle de REFLEX (Pasanisi *et al*, 2008) dont l'approche est résumée ci-après (Azar *et al*, 2007) :

« Avant toute chose, il s'agit d'établir une saisie des données du bâtiment à rénover. Plus les données sont précises, meilleure est l'analyse du bâtiment. Par conséquent, il s'agit d'établir le meilleur compromis entre l'importance acceptée de la procédure d'acquisition des données, et l'imprécision tolérée des résultats des simulations. Lorsque les données du bâtiment sont connues, les performances énergétiques du bâtiment existant peuvent être évaluées. Ces performances avant rénovation permettent d'établir une liste des interventions de rénovation, qui sont analysées suivant des indicateurs de performances. Un choix de combinaisons d'interventions possibles est élaboré suivant leurs conséquences en termes de performance énergétique obtenue, la compatibilité mutuelle des combinaisons possibles, après avoir passé le filtre des contraintes externes au bâtiment. Les combinaisons d'interventions sont ensuite comparées par une analyse multicritères qui décèlera les solutions de rénovation les plus appropriées au bâtiment. ».

L'objectif est de reprendre cette structure et de générer les solutions par l'utilisation des plans d'expériences et de présélectionner les performances par l'utilisation d'une méthode d'optimisation. Les quatre premières étapes (saisie de données, génération des solutions, évaluation des performances et présélection des performances) du principe de fonctionnement de l'outil REFLEX sont reprises par MEXPER et l'organigramme suivant est obtenu :

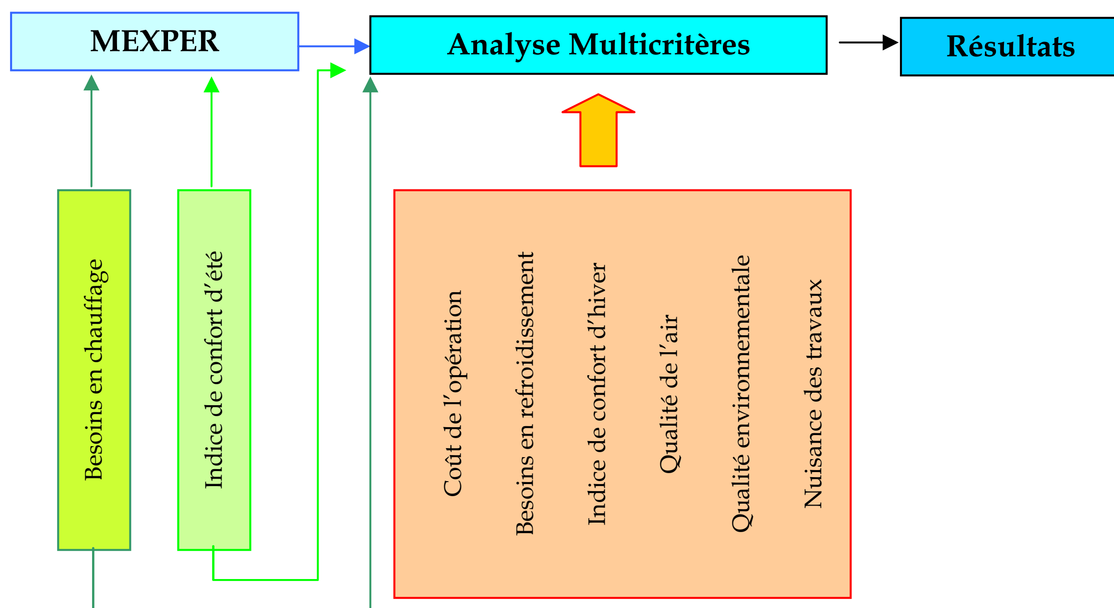


Figure 89. Principe de fonctionnement du logiciel REFLEX-Bio

La méthodologie se focalise sur la comparaison de solutions dites bioclimatiques par une approche multicritères. Le couplage de MEXPER à REFLEX s'effectue par le biais d'un tableau des performances dont les lignes sont les différentes solutions bioclimatiques et les colonnes les critères présélectionnés.

8.2. Développement de l'outil d'aide à la décision Reflex-Bio

L'objectif de ces travaux est la réalisation, en perspectives, d'un outil d'aide à la décision à l'attention du particulier (client EDF) qui souhaite rénover son bâtiment. EDF R&D, dans le cadre du Défi BIEN (Bâtiment Intelligent Econome Naturellement), a réalisé un outil similaire ayant une approche classique. Les documents de référence utilisés pour le développement de cet outil sont repris dans cette partie : (Pasanisi, 2005), (Pasanisi *et al*, 2008) et (Azar *et al*, 2007).

8.2.1. Démarche intellectuelle de l'outil d'aide à la décision

L'efficacité énergétique d'un bâtiment peut être améliorée en agissant sur plusieurs leviers : isolation, ventilation, systèmes énergétiques et leur régulation, éclairage … La rénovation énergétique est donc un processus complexe résultant de la superposition de plusieurs actions, et le nombre d'alternatives devant être examinées est en général assez important. Dans ce cadre, un travail a été initié sur la mise en place d'un outil d'aide à la décision en rénovation bioclimatique des bâtiments. Le choix entre les solutions proposées est difficile parce qu'il doit se faire sur plusieurs critères, qui peuvent être en conflit entre eux : coûts, économies d'énergie, confort, etc. Il s'agit donc d'un problème « multicritères » pour lequel il n'y a pas de solution « optimale » selon tous les points de vue et le « meilleur choix » résulte d'un compromis entre les différentes exigences. Les méthodes d'aide multicritères à la décision constituent un intéressant outil de travail dans tous les problèmes où plusieurs alternatives sont à comparer entre elles sur la base d'un certain nombre de critères antagonistes, et constituent donc le point de départ logique de l'outil développé dans cette analyse.

A qui s'adresse cet outil d'aide à la décision ? Au décideur, qui est censé formuler le problème et fixer les objectifs. Il occupe une position centrale dans le processus! Pour cette étude, le choix du décideur est le client EDF.

Les concepts de base de l'aide multicritères à la décision sont maintenant présentés :

- Les problématiques : selon le problème à résoudre, l'objectif de l'aide à la décision peut consister à :
    - Choisir une solution parmi celles proposées : Problématique α
    - Classer les solutions par ordre d'intérêt : Problématique γ
    - Affecter les solutions à des catégories prédéfinies : Problématique β[74] .

La problématique de cette étude consiste à choisir des solutions climatiques parmi celles qui sont applicables au bâtiment étudié.

- Les relations de préférences : ce sont celles que le décideur est prêt à accepter en comparant entre elles deux solutions (préférence forte, faible, indifférente, incomparable). L'ensemble de ces relations constitue le système de préférences du décideur, que les méthodes d'aide à la décision se proposent de modéliser.

[74] Exemple : solutions excellentes, satisfaisantes ou mauvaises

- **Les critères**, décrits au § 8.2.4, expriment les évaluations quantitatives ou qualitatives de solutions à examiner sur lesquels il est possible de fonder des relations de préférence. Chaque critère peut être associé à un «coefficient d'importance» (ou «d'agrégation») qui exprime l'importance dans le mécanisme de formation des préférences «potentielles» à examiner. C'est le point de départ de l'analyse multicritère qui permet l'évaluation des conséquences des différentes actions.

- **Le tableau des performances** qui synthétise les évaluations des actions selon les critères (généralement une ligne correspond à une action et une colonne à un critère).

L'outil développé présente l'avantage de proposer plusieurs familles de méthodes d'aide à la décision rappelées au § 8.2.2. L'aspect fondamental d'un problème d'aide multicritères à la décision étant que les critères soient en conflit entre eux, ce qui caractérise les différentes familles de méthodes est essentiellement la façon de « gérer » lesdits conflits, et finalement « d'agréger » les critères pour exprimer un jugement global sur les actions.

Les méthodes d'aide multicritères à la décision, les plus couramment utilisées, peuvent être regroupées en trois grandes familles :

- Les méthodes fondées sur la définition d'un critère unique de synthèse : la procédure d'agrégation consiste à combiner les différents critères en un seul, transformant ainsi le problème multicritère en un problème « monocritère ». Ces méthodes ont deux propriétés caractéristiques : elles aboutissent toujours à un classement sans ambiguïté des actions examinées et elles sont compensatoires.
- Les méthodes fondées sur des relations de sur classement (famille ELECTRE : Elimination ET Choix Traduisant la Réalité) : La mise en œuvre de ces méthodes prévoit la comparaison des différentes solutions deux à deux pour établir des relations de « sur classement » entre elles. Ensuite, ces relations sont exploitées de manière différente selon la méthode pour répondre aux exigences demandées par le problème d'aide à la décision (problématique α, β ou γ).
- Les méthodes interactives : elles se caractérisent par le fait que l'algorithme de recherche de la solution la plus intéressante (problématique α) se fait par interaction entre le décideur et le modélisateur (en pratique l'ordinateur). Ces méthodes prévoient des étapes de dialogue (où le décideur accepte ou non la solution proposée par l'ordinateur) et des étapes de calcul (où l'ordinateur recherche une nouvelle proposition sur la base des indications du décideur).

Les typologies de classement se déclinent de la façon suivante : soit suivant un ordre qui est un classement sans ex æquo entre les solutions à analyser, soit par un pré ordre pour lequel le classement admet des ex æquo entre les solutions. Un ordre (ou un pré ordre) pouvant être soit partiel, s'il admet des relations «d'incomparabilité» entre les solutions, soit complet, s'il n'admet pas la notion d'incomparabilité. Au final, on constate que la question de savoir s'il existe en absolu une « bonne » méthode multicritère n'a pas de sens. Une bonne méthode est essentiellement une méthode à la fois adaptée à la nature du problème, et compréhensible par tous les intervenants dans le processus de décision. Le bon choix d'une méthode d'aide à la décision dépend donc d'une série d'éléments dont les plus importants sont la problématique à laquelle on est confronté (α, β ou γ), la possibilité d'accepter des compensations entre les critères, la possibilité d'accepter la notion d'« incomparabilité » entre deux actions, la présence d'incertitude sur une ou plusieurs conséquences des actions examinées.

8.2.2. Les familles d'aide à la décision disponibles dans REFLEX-Bio (Pasanisi, 2007)

Les solutions retenues sont hiérarchisées selon le point de vue du client et d'EDF par le module de sélection multicritère en utilisant une méthode choisie par l'utilisateur (Méthode des distances, ELECTRE III, PROMETHE I ou PROMETHEE II).

Pour plus d'informations, le lecteur est renvoyé aux ouvrages suivants : (Maystre *et al*, 1994) et (Roy *et al*, 1993).

- **Méthode des distances** : Les solutions sont classées entre elles en fonction de leur distance (évaluée sur la base d'une métrique définie dans l'espace des critères) par rapport à une solution "idéale" ayant pour performances les meilleures performances de toutes les solutions analysées. Dans la définition de la métrique entrent en jeu les poids des différents critères ainsi qu'un facteur de compensation qui exprime à quel point une contre-performance sur un critère peut être compensée par une bonne performance sur un autre.

- **Méthode ELECTRE III** (cf. Figure 90) : Elle est basée sur des relations de sur classement. (méthode ELECTRE). En particulier dans ELECTRE III, à chaque relation de sur classement est attribué un degré de crédibilité variable sur une échelle continue entre 0 (pas crédible) et 1 (sûr). Ces degrés de crédibilité (un pour chaque couple de solutions) sont évalués à l'aide d'un nombre important de paramètres selon un algorithme basé, sur les notions de concordance et de discordance. Finalement, une procédure (distillation) permet d'exploiter les degrés de crédibilité pour hiérarchiser les solutions. Ce classement admet des situations d'incomparabilité entre les solutions.

- **Méthodes PROMETHEE** (cf. Figure 91) : Méthodes de la même famille qu'ELECTRE III, qui associent à chaque critère une "fonction de préférence", à valeurs entre 0 et 1, dont l'argument est la différence entre les évaluations selon ledit critère des deux actions à comparer (cf.). Dans PROMETHEE I, ces valeurs sont utilisées pour évaluer trois indices synthétiques (appelés "flux") qui expriment globalement si une action est plutôt préférée aux autres ou non, et établir ainsi un classement final qui, comme dans le cas d'ELECTRE III, peut admettre des situations d'incomparabilité. Dans PROMETHEE II, les trois flux sont agrégés en un seul qui joue, d'une certaine façon, un rôle de « critère unique ». Cet artifice évite les situations d'incomparabilité et aboutit à un classement sans ambiguïté des solutions éligibles.

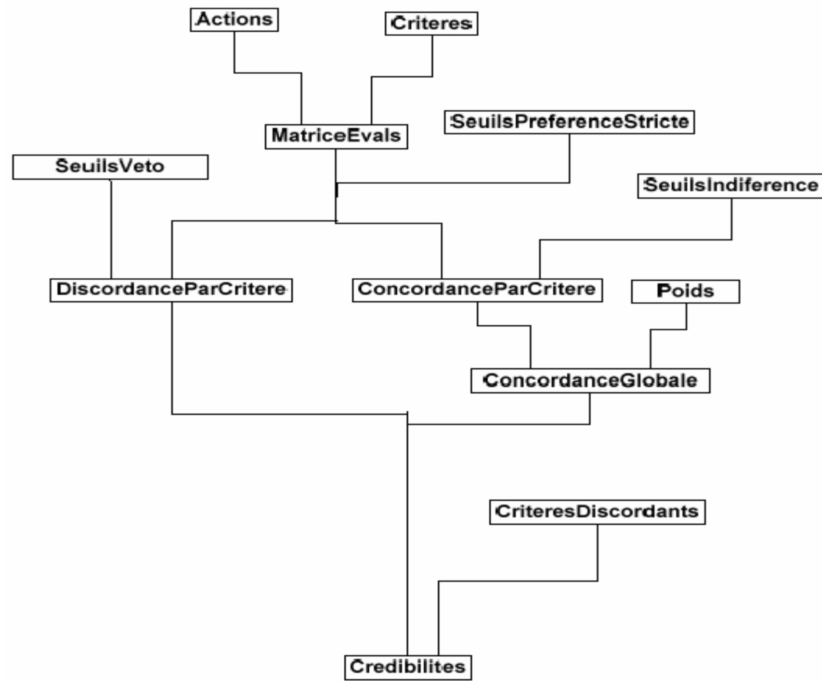


Figure 90. Cheminement de Electre III (Simsek, 2006)

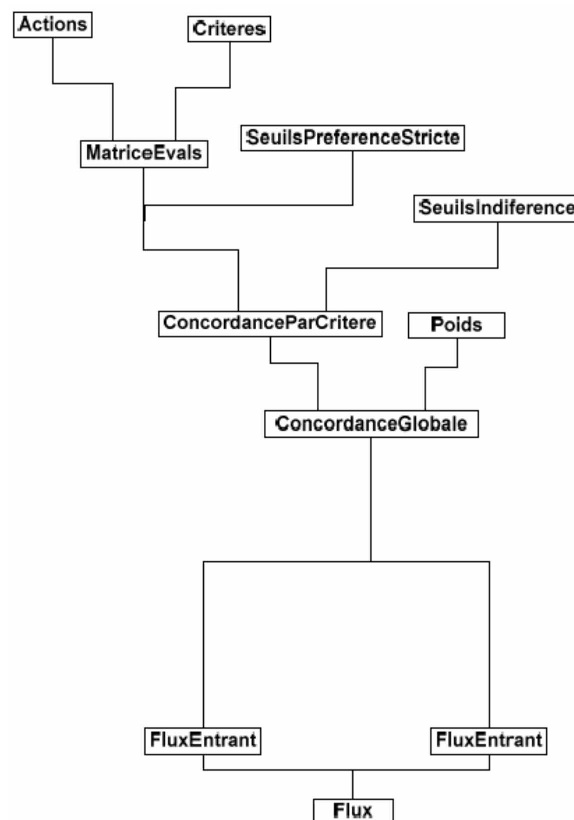


Figure 91. Cheminement des méthodes Prométhée (Simsek, 2006)

Un tableau de synthèse (Tableau 54) résume les principales caractéristiques des méthodes utilisées dans l'outil REFLEX-Bio qui sont basées sur la problématique γ et qui permet, rappelons le, de classer les solutions par ordre d'intérêt.

Tableau 54. Comparaison des principales méthodes disponibles dans REFLEX-Bio

Famille	Restrictions	Méthode	Eléments devant être fournis par le décideur	Complexité de mise en œuvre	Réponses fournies
Méthodes fondées sur un critère unique de synthèse	Indépendance mutuelle des critères demandée. Méthodes compensatoires.	A base de distances	*n* poids des critères, choix d'une métrique	*	Pré ordre complet
Méthodes fondées sur des relations de sur classement	Prise en compte sommaire de l'incertitude	ELECTRE III	n poids des critères, n seuils d'indifférence, n seuils de préférence, n seuil de veto	***	2 pré ordres complets, 1 pré ordre final (partiel), rangs des actions dans le pré ordre final
		PROMETHEE	n poids des critères, n fonctions de préférence (demandant 1 ou 2 paramètres)	**	2 pré ordres (complet et partiel)

Les méthodes d'aide à la décision sélectionnées, les autres paramètres de REFLEX-Bio sont maintenant développés notamment les solutions et critères retenus :

8.2.3. Présentation de l'outil d'aide à la décision REFLEX-Bio

Le nouvel outil, REFLEX-Bio, diffère de l'outil REFLEX par les options étudiées, mais également par les critères retenus (cf. Tableau 55). En revanche, les méthodes utilisées restent inchangées.

Globalement, la méthode reste la même, mais le contenu peut différer. En revanche, certains critères tels que la robustesse des performances ou encore la marge cumulée par EDF ont été difficiles à quantifier dans le cadre de nos applications.

Les différents fichiers d'interfaçage à REFLEX sont renseignés et le nouvel outil REFLEX-Bio a été développé. Selon le bâtiment étudié, le tableau des performances diffère.

Tableau 55. Processus de transformation de l'outil REFLEX en REFLEX-Bio

	REFLEX	REFLEX-BIO
Solutions retenues	Pour l'enveloppe, les composants • les toitures plates • les toitures inclinées • les murs extérieurs • les baies • les planchers Pour les systèmes • le chauffage central • le chauffage électrique • les pompes à chaleur • l'eau chaude sanitaire • la climatisation • la ventilation	Fenêtres performantes Isolation transparente Serre Mur Trombe Puits Canadien Ventilation nocturne Matériaux à Changement de Phase Volets[75]
Critères	Coût de l'opération Gain financier réalisé par le client Augmentation de la marge cumulée EDF Réduction de la consommation énergétique annuelle Certificats d'économies d'énergie obtenus par EDF Réduction des émissions annuelles de CO_2 Qualité environnementale de l'opération Amélioration du confort d'hiver Amélioration du confort d'été Amélioration de la qualité d'air intérieur Amélioration de la facilité de vie Nuisance des travaux Robustesse des performances	Coût de l'opération Réduction des besoins énergétiques Qualité environnementale de l'opération Amélioration du confort d'hiver Amélioration du confort d'été Amélioration de la qualité d'air intérieur Nuisance des travaux

8.2.4. Description des critères retenus dans REFLEX-Bio

A la vue du Tableau 55, le lecteur pourrait croire que la seule différence entre REFLEX et REFLEX-Bio se situe uniquement dans l'utilisation de solutions différentes (cf. Annexes) et au niveau de la sélection des critères « Client ». En réalité, même si les critères portent les mêmes désignations, leur contenu diffère. Ainsi, la qualité environnementale des solutions bioclimatiques n'est pas basée sur la même échelle que les solutions classiques. Le mieux est de situer ce que sous-tendent ces critères.

8.2.4.1. Coût de l'opération

L'objet de cette procédure est d'évaluer pour chaque solution de rénovation le coût de l'opération. Le calcul considère le coût effectif de la solution de rénovation.

75 La stratégie en lien avec les volets consiste à les fermer la nuit en hiver et les appliquer en journée en été.

Description de l'algorithme : Cette évaluation s'inspire des informations données par les fournisseurs (demande de devis aux entreprises) pour les matériaux disponibles sur le marché ou encore d'une moyenne des données économiques pour les procédés peu développés[76]. Les solutions sont ensuite classées par ordre de prix.

8.2.4.2. Qualité environnementale de l'opération

L'objet de cette procédure est d'évaluer pour chaque solution le gain de qualité environnementale offert par la solution de rénovation par rapport au bâtiment existant. La qualité environnementale d'une solution de rénovation est évaluée à partir des appréciations qualitatives du caractère écologique de la solution proposée. Au départ, nous souhaitions agréger ces appréciations en une note allant de 0 à 10 (0 : très bonne, 10 : très mauvaise), indicateur global de la qualité environnementale de solution de rénovation, en intégrant l'analyse du cycle de vie de la solution. La plupart des solutions ne disposant pas de fiche environnementale, nous avons après mûre réflexion, et consultation auprès des personnes en charge de ces questions au sein d'EDF R&D, de tenir compte de ce critère mais de façon non discriminante. Pour ce faire nous évaluons les solutions sur la base de deux notes 0 (impact environnemental estimé comme étant faible) et 1 (impact environnemental estimé comme étant fort).

Tableau 56. Exemple de classement des matériaux selon leur qualité environnementale pour les solutions retenues

Solution	Note
Capteur à air	1
Calfeutrement	0
Fenêtres performantes	1
Isolation transparente	1
Matériaux à changement de phase	1
Mur Trombe	1
Plancher isolé	1
Puits canadien	1
Serre (Double vitrage)	1
Toiture isolée	1
Ventilation nocturne	0
Volets	0

Description de l'algorithme : Les différentes solutions sont classées sur une échelle selon l'appréciation qualitative de leur qualité environnementale (cf. Tableau 56). Ce critère pourra être amené à évoluer quand des fiches environnementales des matériaux seront disponibles. A ce stade de la recherche, il est juste possible de dresser une échelle subjective. Pour une combinaison de solutions, nous avons considéré la somme des solutions.

8.2.4.3. Réduction des besoins en chauffage en hiver

L'objet de cette procédure est d'évaluer pour chaque solution de rénovation la réduction de besoins énergétiques qu'elle induit.

Description de l'algorithme : A chaque solution de rénovation, est associé un calcul de besoins énergétiques estimés par TRNSYS. Dans une perspective d'évolution de l'outil, si la stratégie d'éclairage naturel est intégrée, il faudrait tenir compte des économies d'éclairage

[76] Données disponibles dans la littérature se rapportant aux solutions (cf. Annexes).

artificiel engendrées. Une note est ensuite attribuée en fonction du pourcentage de réduction par rapport au bâtiment non rénové obtenu :

Tableau 57. Notes attribuées en fonction des besoins de chauffage calculés

Besoins calculés par rapport au bâtiment non rénové (%)	Note attribuée
< -80	9
Entre -80 et -60	8
Entre -60 et -40	7
Entre -40 et -20	6
Entre -20 et 0	5
Entre 0 et 20	4
Entre 20 et 40	3
Entre 40 et 60	2
Entre 60 et 80	1
> 80	0

8.2.4.4. Réduction des besoins en refroidissement en été

La procédure est similaire à celle de l'évaluation du critère « Réduction des besoins en chauffage en hiver ». Les besoins évalués sont ceux du système de refroidissement.

8.2.4.5. Amélioration du confort d'hiver

L'objet de cette procédure est d'évaluer pour chaque solution de rénovation le gain de confort thermique en hiver. L'indice de confort énergétique pour une solution de rénovation est une note comprise entre 0 et 100, qui traduit la propension du bâtiment à offrir une ambiance confortable durant l'hiver.

Description de l'algorithme : Le confort d'hiver est intégré par le biais du vote moyen prévisible, le PMV ((Fanger, 1970), (Afnor, 1995), (Ashrae, 1997)). Le PMV est un indicateur de la qualité de l'ambiance qui prend en compte différents paramètres (métabolisme, vêture, vitesse d'air, humidité, température radiante moyenne, température d'air). C'est une des sorties disponibles au niveau du modèle de bâtiment de TRNSYS. En hiver, pour son calcul, on considère une vitesse d'air de 0,15m/s pour les calculs dans chaque zone. Une fois le PMV calculé pour toutes les pièces, il est pondéré en fonction du taux d'occupation de la pièce. Le métabolisme retenu est indiqué dans le Tableau 32. On considère une vêture de 0,5 clo en été (vêtement léger d'été) et de 1 clo en hiver (TRNSYS, 2004). Un PMV global pour la maison est obtenu. Pour chaque solution de rénovation le gain de confort thermique est ensuite déterminé par le calcul d'un indice. L'indice de confort énergétique pour une solution de rénovation est une note comprise entre 0 et 100, qui traduit la propension du bâtiment à offrir une ambiance proche d'une ambiance de confort tout au long de l'année.

L'algorithme fonctionne en quatre étapes :

- Première étape : Calculs des plages de confort d'hiver. La procédure calcule 4 plages de confort A, B, C et D centrées autour d'une zone de confort. Les plages de confort sont construites de la manière suivante :

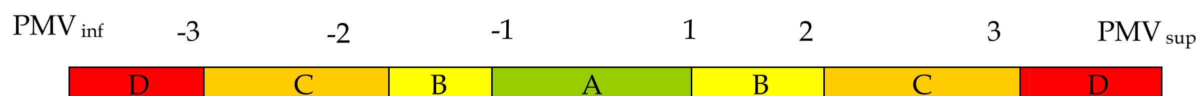


Figure 92. Définition des plages de variation de l'indice de confort d'hiver

- Deuxième étape : La procédure calcule la fréquence d'occurrence des différentes plages de confort de la même manière que pour l'indice de confort (cf. § 4.5.2.2).

La procédure ne tient compte que des heures où le bâtiment est occupé, en effet la notion de confort n'a de sens qu'en présence d'occupants. A partir des estimations du PMV heure par heure calculées par TRNSYS, la procédure calcule le nombre d'heures passées dans l'année dans les plages de confort A, B, C et D. Ces fréquences d'occurrence sont notées f_A, f_B, f_C et f_D.

- Troisième étape : Construction de l'indice de confort à partir de ces fréquences d'occurrence de la même manière que pour l'indice de confort (cf. § 4.5.2.2).
- Quatrième étape : Construction du critère « gain de confort en hiver ».

Pour chaque solution le critère gain de confort s'obtient en calculant la différence entre l'indice de confort de la solution et celui de la solution sans intervention de rénovation.

8.2.4.6. Amélioration du confort d'été

La procédure est similaire à celle de l'évaluation du critère « Amélioration du confort d'hiver ». En revanche, c'est l'approche adaptative qui est retenue. L'indice du confort d'été a été présenté dans la partie traitant des indicateurs retenus pour les plans d'expériences (cf. § 4.5.2).

8.2.4.7. Amélioration de la qualité de l'air intérieur

L'objet de cette procédure est d'évaluer pour chaque solution de rénovation le gain de qualité d'air intérieur. La qualité de l'air intérieure est évaluée par une note en fonction de la concentration de $C0_2$ calculée dans le bâtiment.

Description de l'algorithme : L'algorithme fonctionne en deux étapes :

Première étape : Calculs de la concentration de CO_2 en ppm (partie par million) dans le bâtiment (Azar *et al*, 2007) :

$$C_{CO_2} = \frac{n_{occupants} \times 0.25 \times Act \times 60}{\tau \times V_{ventilé}} \times 1000000$$ **Equation 21**

Le numérateur de la fraction est égal au débit volumique de CO_2 produit par les occupants en une heure où :

- $n_{occupants}$ est le nombre d'occupants du bâtiment
- Act est l'activité des occupants (unité : *met*)
- 0.25 est le nombre de litre de CO_2 produit en une minute par unité d'activité (unité : *l/min/met*)
- La multiplication par 60 permet de changer l'unité de temps (passer de minute à heure).

Le dénominateur de la fraction est égal au débit d'air parcourant le bâtiment en une heure, où :

- τ est le taux de renouvellement d'air (unité : *vol/h*)
- $V_{ventilé}$ est le volume du bâtiment.

L'étude intègre le traitement aéraulique par le biais de TRNFLOW (TRNFLOW, 2006) qui propose un panel conséquent de sorties dont le débit en kg/s. TRNFLOW fournit directement le débit d'air soit pour une pièce, soit pour tout le bâtiment. C'est cette dernière sortie qui nous intéresse. La fraction est multipliée par 1000000 afin de passer en unité ppm (nombre de parties par million).

Deuxième étape : Attribution d'une note en fonction de la concentration en CO_2 à l'intérieur du bâtiment. Selon la concentration calculée on attribue une note à la qualité de l'air intérieur en comparant la solution au bâtiment non rénové. La note attribuée est indiquée dans le tableau ci-dessous (cf. Tableau 58).

Tableau 58. Notes attribuées en fonction de la concentration en CO_2

Concentration calculée par rapport au bâtiment non rénové (%)	Note attribuée
< -40	15
Entre -40 et -30	14
Entre -30 et -25	13
Entre -25 et -20	12
Entre -20 et -15	11
Entre -15 et -10	10
Entre -10 et -5	9
Entre -5 et 0	8
Entre 0 et 5	7
Entre 5 et 10	6
Entre 10 et 15	5
Entre 15 et 20	4
Entre 20 et 25	3
Entre 25 et 30	2
Entre 30 et 40	1
> 40	0

8.2.4.8. Nuisance des travaux

L'objet de cette procédure est d'évaluer pour chaque solution de rénovation la nuisance induite par les travaux. La nuisance des travaux est appréciée par une note qualitative croisant trois critères : l'ampleur des travaux, l'habitabilité du logement pendant les travaux et la durée des travaux.

Description de l'algorithme : La procédure fonctionne en deux temps :

1- Construction de la « note 1 » agrégeant une note relative à l'ampleur des travaux et une note relative à l'habitabilité du logement pendant les travaux.
2- Construction de la note « nuisance des travaux » en croisant la note 1 avec une note relative à la durée des travaux.

(1) Construction de la « note 1 » : On distingue 3 classes d'ampleur des travaux : très légers ou ayant lieu hors zone de vie (zdv) (A), légers dans zone de vie (B) et enfin lourds dans zone de vie (C). De même, on distingue 3 classes d'habitabilité pendant les travaux : totale (A), partielle (B) et Nulle (C). Ces deux critères sont croisés afin d'obtenir la note 1 selon les modalités suivantes :

Tableau 59. Construction de la « note 1 »[77]

NOTE AGGR. 1		Ampleur des travaux		
		Lourds dans zdv	Légers dans zdv	Très légers / Hors_zdv
Habitabilité du logement		C	B	A
Totale	A	2	1	0
Partielle	B	3	2	1
Nulle	C	4	4	4

(2) Construction de la note « nuisance des travaux » : Par croisement de la note 1 avec la durée des travaux, on construit la note « nuisance des travaux », donnant une appréciation générale de la nuisance induite par les travaux :

Tableau 60. Construction de la note nuisance des travaux

NOTE NUISANCE TRVX		Durée des travaux			
		> 6 semaines	< 6 semaines	< 2 semaines	< 1 semaine
NOTE AGGR. 1		3	2	1	0
0		5	6	9	10
1		4	5	8	9
2		2	3	6	8
3		1	2	5	7
4		0	1	4	6

Tableau 61. Exemple de notes attribuées aux solutions bioclimatiques[78]

Solutions	Note AGGR. 1	NOTE NUISANCE TRVX
Calfeutrement	0	9
Capteur à air	0	6
Fenêtres performantes	3	7
Isolation transparente	0	5
Matériaux à changement de phase	4	1
Mur Trombe	4	1
Plancher isolé	4	4
Volets	0	8
Puits canadien	0	5
Serre	1	5
Toiture isolée	2	3
Ventilation naturelle	0	10

Pour une combinaison de solutions, la note retenue est celle de la solution induisant le plus de nuisances (soit la plus faible note des solutions).

Ces critères permettent de remplir les lignes du tableau de performances pour chaque solution ou couplage de solutions retenues (cf. 8.2.5), mais auparavant leurs différences avec ceux de REFLEX sont indiquées.

77 Où 0 est la meilleure note.

78 La nuisance des travaux est évaluée sur une échelle allant de 0 (nuisance importante) à 10 (très peu nuisible).

8.2.4.9. **Conclusions :** Modifications apportées à REFLEX-Bio par rapport à REFLEX

Au niveau des critères, même si le même a été repris, leur contenu diffère par rapport à ce qui a été présenté au paragraphe précédent et est indiqué dans le tableau suivant :

Tableau 62. Modifications apportées à REFLEX-Bio par rapport à REFLEX

CRITERES	MODIFICATIONS
Coût de l'opération	Cet algorithme diffère de celui de REFLEX qui intégraient toutes les données économiques relatives à la solution de rénovation : coût de l'opération, subventions, montant du crédit, durée et intérêt de ce dernier.
Réduction des besoins énergétiques	Dans REFLEX, à chaque solution de rénovation est associé la consommation énergétique annuelle en kWh pour chacune des énergies mises en jeu ainsi que leurs usages. Dans cette procédure sont considérés : les consommations électriques pour le chauffage, consommations électriques pour la climatisation, consommations électriques pour l'ECS, consommations de combustible pour le chauffage, consommations de combustible pour l'ECS.
Qualité environnementale de l'opération	La qualité environnementale d'une solution de rénovation dans REFLEX est évaluée à partir des appréciations qualitatives du caractère écologique du système de chauffage, de l'énergie de chauffage, de l'énergie utilisée pour l'eau chaude sanitaire, des matériaux de parement et d'isolation du bâti. La procédure fonctionne en quatre temps : la construction de la note énergie, suivie de la construction de la note matériaux puis de l'agrégation des notes énergie et matériaux : construction de la note qualité environnementale et enfin de la construction du critère « gain de qualité environnementale ».
Amélioration du confort d'hiver	Dans REFLEX, la procédure tient compte de la fréquence d'occurrence des différentes plages de température.
Amélioration du confort d'été	Evolution de l'algorithme : dans REFLEX la procédure est similaire à celle de l'évaluation du critère « Amélioration du confort d'hiver » en tenant compte de la fréquence d'occurrence des différentes plages de température.
Amélioration de la qualité d'air intérieur	L'algorithme fonctionne en trois étapes dans REFLEX. La concentration en CO_2 est déterminée, puis une note est attribuée en fonction de cette concentration. Enfin, le critère « Gain de qualité de l'air intérieur » est construit par différence entre les notes de la solution et celle du bâtiment existant (pas d'interventions de rénovations). Par ailleurs, le débit est directement calculé par TRNFLOW dans REFLEX-Bio.
Nuisance des travaux	La procédure est similaire.

8.2.5. Réalisation du tableau des performances et visualisation des résultats de REFLEX-Bio

Pour chacune des solutions, les critères sont évalués (cf. § 8.2.4). Les tableaux de performances suivants sont obtenus pour les différentes météos :

Tableau 63. Désignation des critères

Descriptif	Désignation
Coût de l'opération	CRITFIN
Qualité environnementale de l'opération	CRITENV
Réduction des besoins en chauffage	CRITENE1
Réduction des besoins en refroidissement	CRITENE2
Amélioration du confort d'hiver	CRITCFT1
Amélioration du confort d'été	CRITCFT2
Amélioration de la qualité d'air intérieur	CRITCFT3
Nuisance des travaux	CRITDIV

8.2.5.1. Appartement situé à Lille

Tableau 64. Tableau des performances du logement collectif de 1900 à Lille

N°	SOLUTIONS	CRITFIN	CRITENV	CRITENE1	CRITENE2	CRITCFT1	CRITCFT2	CRITCFT3	CRITDIV
1	Calfeutrement	220	0	5	4	45	44	0	9
2	Fenêtres performantes	9016	1	7	0	47	40	13	7
3	Calfeutrement + Fenêtres performantes	9236	1	7	0	47	40	8	7
4	Volets	2254	0	4	9	44	49	8	8
5	Calfeutrement + Volets	2474	0	5	9	45	49	0	8
6	Fenêtres performantes + Volets	11270	1	7	9	47	49	13	7
7	Calfeutrement + Fenêtres performantes + Volets	11490	1	7	9	47	49	3	7
8	Isolation transparente	35600	1	7	0	47	40	11	5
9	Calfeutrement + Isolation transparente	35820	1	7	0	47	40	0	5
10	Fenêtres performantes + Isolation transparente	44616	2	9	0	49	40	15	5
11	Calfeutrement + Fenêtres performantes + Isolation transparente	44836	2	9	0	49	40	15	5
12	Volets + Isolation transparente	37854	1	7	9	47	49	11	5
13	Calfeutrement + Volets + Isolation transparente	38074	1	7	9	47	49	1	5
14	Fenêtres performantes + Volets+ Isolation transparente	46870	2	9	4	49	44	15	5
15	Calfeutrement + Fenêtres performantes + Volets + Isolation transparente	47090	2	9	2	49	42	15	5
16	Ventilation naturelle	0	0	4	9	44	49	8	10
17	Calfeutrement + Ventilation naturelle	220	0	5	9	45	49	0	9
18	Fenêtres performantes + Ventilation naturelle	9016	1	7	9	47	49	14	7
19	Calfeutrement + Fenêtres performantes + Ventilation naturelle	9236	1	7	9	47	49	3	7
20	Volets + Ventilation naturelle	2254	0	4	9	44	49	8	8
21	Calfeutrement + Volets + Ventilation naturelle	2474	0	5	9	45	49	0	8
22	Fenêtres performantes + Volets + Ventilation naturelle	11270	1	7	9	47	49	14	7

N°	SOLUTIONS	CRITFIN	CRITENV	CRITENE1	CRITENE2	CRITCFT1	CRITCFT2	CRITCFT3	CRITDIV
23	Calfeutrement + Fenêtres performantes + Volets + Ventilation naturelle	11490	1	7	9	47	49	3	7
24	Isolation transparente + Ventilation naturelle	35600	1	7	9	47	49	12	5
25	Calfeutrement + Isolation transparente + Ventilation naturelle	35820	1	7	9	47	49	0	5
26	Fenêtres performantes + Isolation transparente + Ventilation naturelle	44616	2	9	8	49	48	15	5
27	Calfeutrement + Fenêtres performantes + Isolation transparente + Ventilation naturelle	44836	2	9	0	49	40	15	5
28	Volets + Isolation transparente + Ventilation naturelle	37854	1	7	9	47	49	11	5
29	Calfeutrement + Volets + Isolation transparente + Ventilation naturelle	38074	1	7	9	47	49	0	5
30	Fenêtres performantes + Volets+ Isolation transparente + Ventilation naturelle	46870	2	9	9	49	49	15	5
31	Calfeutrement + Fenêtres performantes + Volets + Isolation transparente + Ventilation naturelle	47090	2	9	8	49	48	15	5
32	Inertie	975	1	5	5	45	45	7	1
33	Calfeutrement + Inertie	1195	1	5	4	45	44	0	1
34	Fenêtres performantes + Inertie	9991	2	7	0	47	40	13	1
35	Calfeutrement + Fenêtres performantes + Inertie	10211	2	7	0	47	40	5	1
36	Volets + Inertie	3229	1	4	9	44	49	8	1
37	Calfeutrement + Volets + Inertie	3449	1	5	9	45	49	0	1
38	Fenêtres performantes + Volets + Inertie	12245	2	7	9	47	49	14	1
39	Calfeutrement + Fenêtres performantes + Volets + Inertie	13440	3	7	9	47	49	5	1
40	Isolation transparente + Inertie	36575	2	7	0	47	40	12	1
41	Calfeutrement + Isolation transparente + Inertie	36795	2	7	0	47	40	2	1
42	Fenêtres performantes + Isolation transparente + Inertie	45591	3	9	0	49	40	15	1
43	Calfeutrement + Fenêtres performantes + Isolation transparente + Inertie	45811	3	9	0	49	40	15	1
44	Volets + Isolation transparente + Inertie	38829	2	7	9	47	49	12	1
45	Calfeutrement + Volets + Isolation transparente + Inertie	39049	2	7	9	47	49	2	1
46	Fenêtres performantes + Volets+ Isolation transparente + Inertie	47845	3	9	5	49	45	15	1
47	Calfeutrement + Fenêtres performantes + Volets + Isolation transparente + Inertie	48065	3	9	3	49	43	15	1
48	Ventilation naturelle + Inertie	975	1	4	9	44	49	9	1
49	Calfeutrement + Ventilation naturelle + Inertie	1195	1	5	9	45	49	0	1
50	Fenêtres performantes + Ventilation naturelle + Inertie	9991	2	7	9	47	49	14	1
51	Calfeutrement + Fenêtres performantes + Ventilation naturelle+ Inertie	10211	2	7	9	47	49	3	1
52	Volets + Ventilation naturelle + Inertie	3229	1	4	9	44	49	8	1
53	Calfeutrement + Volets + Ventilation naturelle + Inertie	3449	1	5	9	45	49	0	1
54	Fenêtres performantes + Volets + Ventilation naturelle + Inertie	12245	2	7	9	47	49	14	1
55	Calfeutrement + Fenêtres performantes + Volets + Ventilation naturelle + Inertie	13440	3	7	9	47	49	1	1
56	Isolation transparente + Ventilation naturelle + Inertie	36575	2	7	9	47	49	13	1
57	Calfeutrement + Isolation transparente + Ventilation naturelle + Inertie	36795	2	7	9	47	49	1	1
58	Fenêtres performantes + Isolation transparente + Ventilation naturelle + Inertie	45591	3	9	9	49	49	15	1
59	Calfeutrement + Fenêtres performantes + Isolation transparente + Ventilation naturelle + Inertie	45811	3	9	8	49	48	15	1
60	Volets + Isolation transparente + Ventilation naturelle + Inertie	38829	2	7	9	47	49	12	1
61	Calfeutrement + Volets + Isolation transparente + Ventilation naturelle + Inertie	39049	2	7	9	47	49	2	1
62	Fenêtres performantes + Volets+ Isolation transparente + Ventilation naturelle + Inertie	47845	3	9	9	49	49	15	1
63	Calfeutrement + Fenêtres performantes + Volets + Isolation transparente + Ventilation naturelle + Inertie	48065	3	9	8	49	48	15	1

L'outil d'aide à la décision permet de choisir en fonction des critères, la ou les solution(s) intéressante(s). Les résultats sont présentés pour la méthode ELECTRE III dans tous les cas :

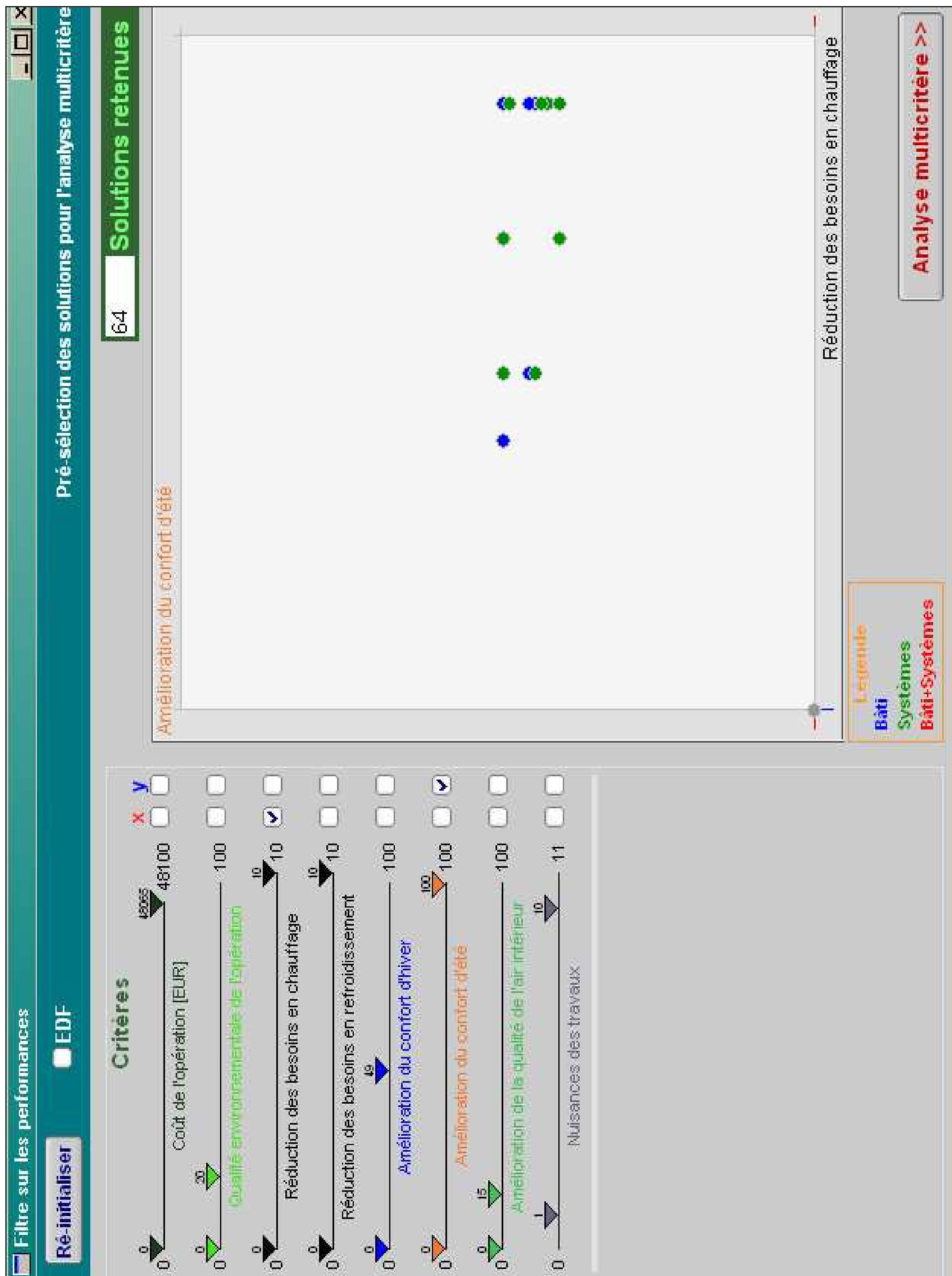


Figure 93. Présentation de l'interface pour les critères « Besoins en chauffage » et « Indice de confort d'été »

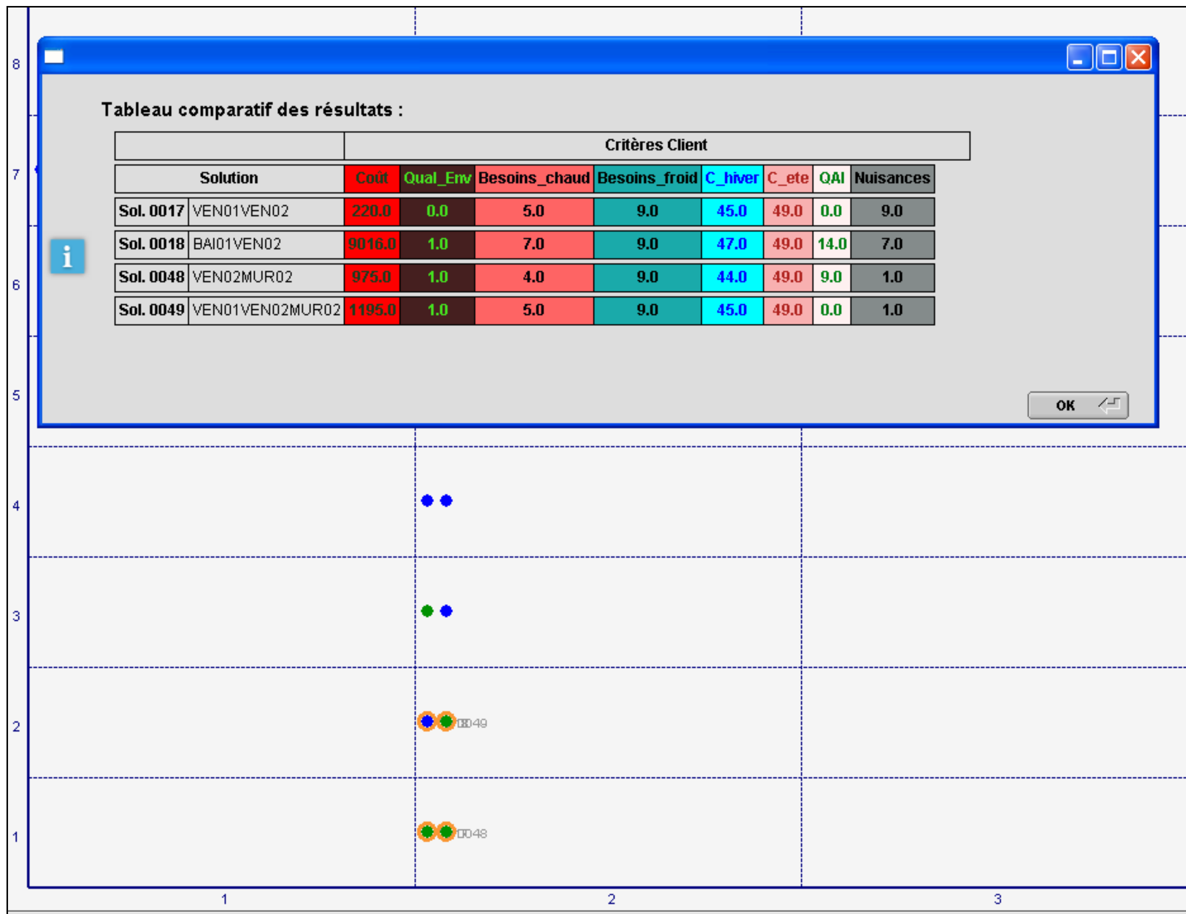


Tableau comparatif des résultats :

		Critères Client							
Solution		Coût	Qual_Env	Besoins_chaud	Besoins_froid	C_hiver	C_ete	QAI	Nuisances
Sol. 0017	VEN01VEN02	220.0	0.0	5.0	9.0	45.0	49.0	0.0	9.0
Sol. 0018	BAI01VEN02	9016.0	1.0	7.0	9.0	47.0	49.0	14.0	7.0
Sol. 0048	VEN02MUR02	975.0	1.0	4.0	9.0	44.0	49.0	9.0	1.0
Sol. 0049	VEN01VEN02MUR02	1195.0	1.0	5.0	9.0	45.0	49.0	0.0	1.0

Figure 94. Présentation des résultats de l'analyse multicritères pour le logement collectif à Lille

Les solutions indiquées correspondent aux numéros du Tableau 64 (première colonne). A Lille, le classement suivant est obtenu pour les différentes solutions :

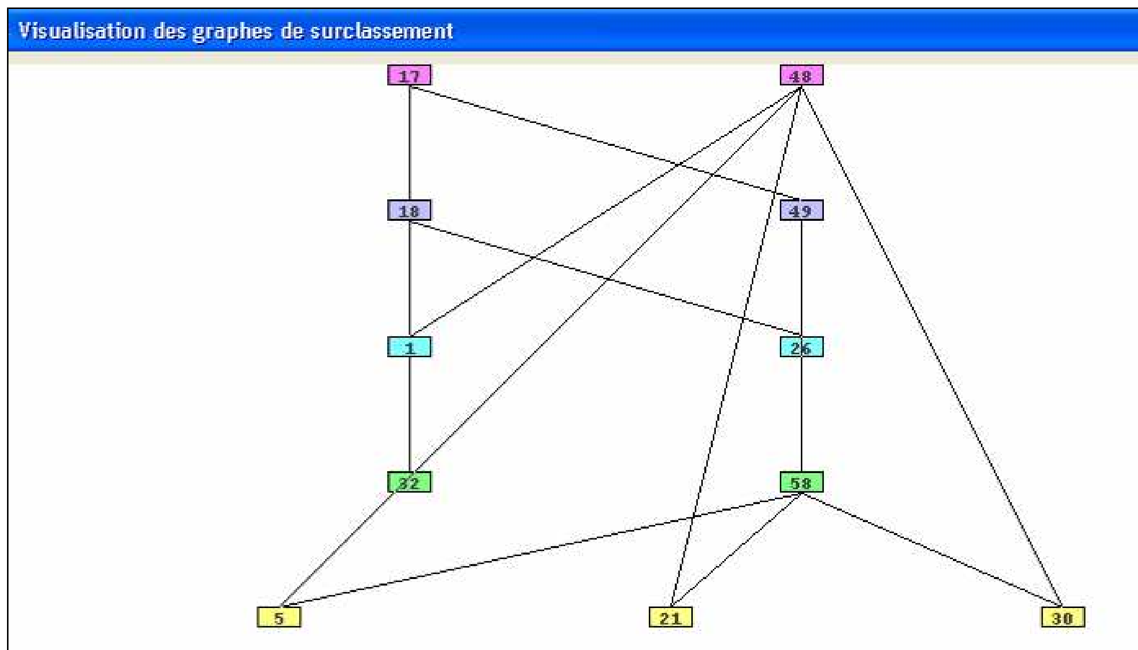


Figure 95. Graphe de sur classement pour le logement collectif à Lille

A Lille (Figure 95), les solutions 17 et 48 surclassent les solutions 18 et 49, qui elles même surclassent les solutions 1, 26, 32, 58, 5, 21 et 30. Finalement, le classement suivant est obtenu (la première solution étant celle qui favorise le meilleur compromis entre tous les critères) :

- Calfeutrement + Ventilation naturelle (solution 17) ou Ventilation naturelle + Inertie (solution 48)
- Fenêtres performantes + Ventilation naturelle (solution 18) ou Calfeutrement + Ventilation naturelle + Inertie (solution 49)
- Calfeutrement (solution 1) ou Fenêtres performantes + Isolation transparente + Ventilation naturelle (solution 26)
- Inertie (solution 32) ou Fenêtres performantes + Isolation transparente + Ventilation naturelle + Inertie (solution 58)
- Calfeutrement + Volets (solution 5) ou Calfeutrement + Volets + Ventilation naturelle (solution 21) ou encore Fenêtres performantes + Volets+ Isolation transparente + Ventilation naturelle (solution 30).

8.2.5.2. Appartement situé à Marseille

Tableau 65. Tableau des performances du logement collectif de 1966 à Marseille

N°	SOLUTIONS	CRITFIN	CRITENV	CRITENE1	CRITENE2	CRITCFT1	CRITCFT2	CRITCFT3	CRITDIV
1	Calfeutrement	220	0	5	4	48	44	0	9
2	Fenêtres performantes	9016	1	8	4	48	44	1	7
3	Calfeutrement + Fenêtres performantes	9236	1	8	4	44	49	0	7
4	Volets	2254	0	4	9	45	49	5	8
5	Calfeutrement + Volets	2474	0	5	9	48	49	0	8
6	Fenêtres performantes + Volets	11270	1	8	9	48	48	1	7
7	Calfeutrement + Fenêtres performantes + Volets	11490	1	8	8	47	43	0	7
8	Isolation transparente	35600	1	7	3	48	43	9	5
9	Calfeutrement + Isolation transparente	35820	1	8	3	49	41	0	5
10	Fenêtres performantes + Isolation transparente	44616	2	9	1	49	41	5	5
11	Calfeutrement + Fenêtres performantes + Isolation transparente	44836	2	9	1	47	49	0	5
12	Volets + Isolation transparente	37854	1	7	9	48	49	6	5
13	Calfeutrement + Volets + Isolation transparente	38074	1	8	9	49	46	0	5
14	Fenêtres performantes + Volets+ Isolation transparente	46870	2	9	6	49	46	3	5
15	Calfeutrement + Fenêtres performantes + Volets + Isolation transparente	47090	2	9	6	44	48	0	5
16	Ventilation naturelle	0	0	4	8	45	48	8	10
17	Calfeutrement + Ventilation naturelle	220	0	5	8	48	48	0	9
18	Fenêtres performantes + Ventilation naturelle	9016	1	8	8	48	48	4	7
19	Calfeutrement + Fenêtres performantes + Ventilation naturelle	9236	1	8	8	44	49	0	7
20	Volets + Ventilation naturelle	2254	0	4	9	45	49	8	8
21	Calfeutrement + Volets + Ventilation naturelle	2474	0	5	9	48	49	0	8
22	Fenêtres performantes + Volets + Ventilation naturelle	11270	1	8	9	48	48	4	7
23	Calfeutrement + Fenêtres performantes + Volets + Ventilation naturelle	11490	1	8	8	47	48	0	7
24	Isolation transparente + Ventilation naturelle	35600	1	7	8	48	43	10	5
25	Calfeutrement + Isolation transparente + Ventilation naturelle	35820	1	8	3	49	47	0	5
26	Fenêtres performantes + Isolation transparente + Ventilation naturelle	44616	2	9	7	49	41	6	5
27	Calfeutrement + Fenêtres performantes + Isolation transparente + Ventilation naturelle	44836	2	9	1	47	49	0	5

N°	SOLUTIONS	CRITFIN	CRITENV	CRITENE1	CRITENE2	CRITCFT1	CRITCFT2	CRITCFT3	CRITDIV
28	Volets + Isolation transparente + Ventilation naturelle	37854	1	7	9	48	49	9	5
29	Calfeutrement + Volets + Isolation transparente + Ventilation naturelle	38074	1	8	9	49	48	0	5
30	Fenêtres performantes + Volets+ Isolation transparente + Ventilation naturelle	46870	2	9	8	49	48	6	5
31	Calfeutrement + Fenêtres performantes + Volets + Isolation transparente + Ventilation naturelle	47090	2	9	8	45	45	0	5
32	Inertie	975	1	5	5	45	44	8	1
33	Calfeutrement + Inertie	1195	1	5	4	48	44	0	1
34	Fenêtres performantes + Inertie	9991	2	8	4	48	44	1	1
35	Calfeutrement + Fenêtres performantes + Inertie	10211	2	8	4	44	49	0	1
36	Volets + Inertie	3229	1	4	9	45	49	5	1
37	Calfeutrement + Volets + Inertie	3449	1	5	9	48	49	0	1
38	Fenêtres performantes + Volets + Inertie	12245	2	8	9	48	49	1	1
39	Calfeutrement + Fenêtres performantes + Volets + Inertie	13440	3	8	9	47	43	0	1
40	Isolation transparente + Inertie	36575	2	7	3	48	43	9	1
41	Calfeutrement + Isolation transparente + Inertie	36795	2	8	3	49	41	0	1
42	Fenêtres performantes + Isolation transparente + Inertie	45591	3	9	1	49	41	5	1
43	Calfeutrement + Fenêtres performantes + Isolation transparente + Inertie	45811	3	9	1	47	49	0	1
44	Volets + Isolation transparente + Inertie	38829	2	7	9	48	49	6	1
45	Calfeutrement + Volets + Isolation transparente + Inertie	39049	2	8	9	49	46	0	1
46	Fenêtres performantes + Volets+ Isolation transparente + Inertie	47845	3	9	6	49	46	3	1
47	Calfeutrement + Fenêtres performantes + Volets + Isolation transparente + Inertie	48065	3	9	6	44	48	0	1
48	Ventilation naturelle + Inertie	975	1	4	8	45	48	8	1
49	Calfeutrement + Ventilation naturelle + Inertie	1195	1	5	8	48	48	0	1
50	Fenêtres performantes + Ventilation naturelle + Inertie	9991	2	8	8	48	48	4	1
51	Calfeutrement + Fenêtres performantes + Ventilation naturelle+ Inertie	10211	2	8	8	44	49	0	1
52	Volets + Ventilation naturelle + Inertie	3229	1	4	9	45	49	8	1
53	Calfeutrement + Volets + Ventilation naturelle + Inertie	3449	1	5	9	48	49	0	1
54	Fenêtres performantes + Volets + Ventilation naturelle + Inertie	12245	2	8	9	48	49	4	1
55	Calfeutrement + Fenêtres performantes + Volets + Ventilation naturelle + Inertie	13440	3	8	9	47	48	0	1
56	Isolation transparente + Ventilation naturelle + Inertie	36575	2	7	8	48	48	10	1
57	Calfeutrement + Isolation transparente + Ventilation naturelle + Inertie	36795	2	8	8	49	47	0	1
58	Fenêtres performantes + Isolation transparente + Ventilation naturelle + Inertie	45591	3	9	7	49	47	6	1
59	Calfeutrement + Fenêtres performantes + Isolation transparente + Ventilation naturelle + Inertie	45811	3	9	7	47	49	0	1
60	Volets + Isolation transparente + Ventilation naturelle + Inertie	38829	2	7	9	48	49	10	1
61	Calfeutrement + Volets + Isolation transparente + Ventilation naturelle + Inertie	39049	2	8	9	49	48	0	1
62	Fenêtres performantes + Volets+ Isolation transparente + Ventilation naturelle + Inertie	47845	3	9	8	49	48	6	1
63	Calfeutrement + Fenêtres performantes + Volets + Isolation transparente + Ventilation naturelle + Inertie	48065	3	9	8	40	40	0	1

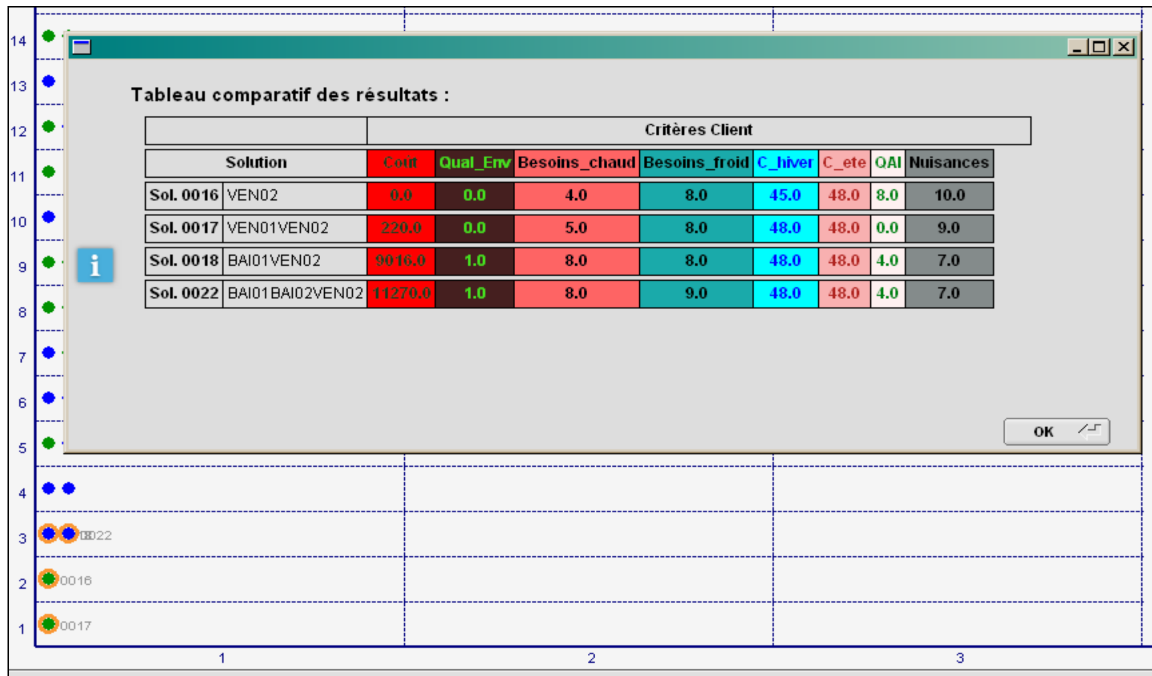


Tableau comparatif des résultats :

Solution		Critères Client							
Solution		Coût	Qual_Env	Besoins_chaud	Besoins_froid	C_hiver	C_ete	QAI	Nuisances
Sol. 0016	VEN02	0.0	0.0	4.0	8.0	45.0	48.0	8.0	10.0
Sol. 0017	VEN01VEN02	220.0	0.0	5.0	8.0	48.0	48.0	0.0	9.0
Sol. 0018	BAI01VEN02	9016.0	1.0	8.0	8.0	48.0	48.0	4.0	7.0
Sol. 0022	BAI01BAI02VEN02	11270.0	1.0	8.0	9.0	48.0	48.0	4.0	7.0

Figure 96. Présentation des résultats de l'analyse multicritères pour le logement collectif à Marseille

A Marseille (Figure 96), le classement suivant est obtenu pour les différentes solutions :

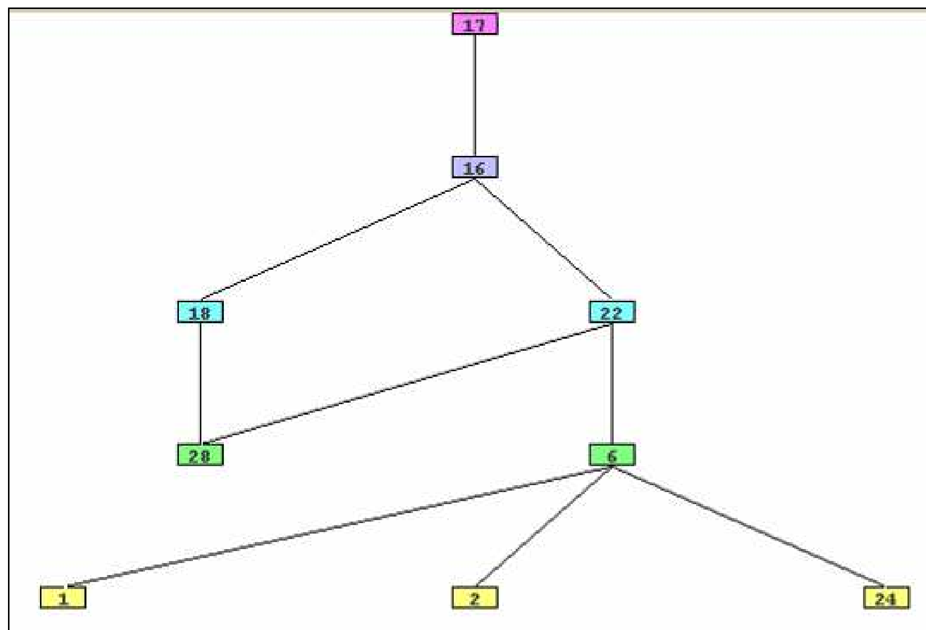


Figure 97. Graphe de sur classement pour le logement collectif à Marseille

A Marseille (Figure 97), la solution 17 surclasse la solutions 16 qui surclasse les solutions 18 et 22 qui surclassent les solutions 28 et 6, qui elles même surclassent les solutions 1, 2 et 24. Finalement, le classement suivant est obtenu (la première solution étant celle qui favorise le meilleur compromis entre tous les critères) :

- Calfeutrement + Ventilation naturelle (solution 17)
- Ventilation naturelle (solution 16)

- Fenêtres performantes + Ventilation naturelle (solution 18) ou Fenêtres performantes + Volets + Ventilation naturelle (solution 22)
- Volets + Isolation transparente + Ventilation naturelle (solution 28) ou Fenêtres performantes + Volets (solution 6)
- Calfeutrement (solution 1) ou Fenêtres (solution 2) ou encore Isolation transparente + Ventilation naturelle (solution 24).

8.2.6. Conclusions sur l'application de la méthodologie MEXPER sur un logement collectif de 1900

Les plans d'expériences réalisés sur les deux villes permettent de dégager les grandes tendances de rénovation en terme énergétique (besoins en chauffage) et de confort (approche adaptative en été qui présuppose l'utilisation maximale de solutions passives). Des effets différents sont obtenus en fonction des réponses analysées et des zones graphiques considérées. Ainsi, en hiver, même si la rénovation des fenêtres et l'isolation par l'extérieur constituent les principales préconisations, elles diffèrent pour le confort d'été. Les solutions d'hiver devraient être associées à des mesures adéquates à Marseille notamment à l'installation de volets et à l'application de la ventilation nocturne en été. En considérant une approche globale par l'intégration d'indicateurs supplémentaires (économique, environnemental, sanitaire notamment), des préconisations différentes sont obtenues. Dans les deux zones géographiques, l'outil développé propose au décideur de calfeutrer son bâtiment et d'appliquer la ventilation naturelle. Ces solutions ont l'avantage d'être peu onéreuses et d'induire peu de nuisances.

Si on priorise les besoins en chauffage et l'indice de confort d'été, l'outil d'aide à la décision a l'avantage par rapport à la méthodologie des plans d'expériences, de préconiser des solutions favorisant un compromis entre les performances d'hiver et d'été retenues. Ci-dessous la représentation graphique des solutions obtenues dans cette configuration :

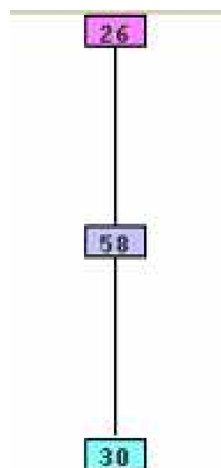


Figure 98. Graphe de sur classement avec une exigence forte sur la réduction des besoins en chauffage (note comprise entre 8 et 9) et l'amélioration du confort d'été (indice compris entre 40 et 49) pour le logement collectif Lille

A Lille (Figure 98), en priorisant les besoins de chauffage et l'indice de confort d'été, le classement suivant est obtenu (la première solution étant celle qui favorise le meilleur compromis entre les deux critères sélectionnés) :

- Fenêtres performantes + Isolation transparente + Ventilation naturelle (solution 26)
- Fenêtres performantes + Isolation transparente + Ventilation naturelle + Inertie (solution 58)
- Fenêtres performantes + Volets+ Isolation transparente + Ventilation naturelle (solution 30).

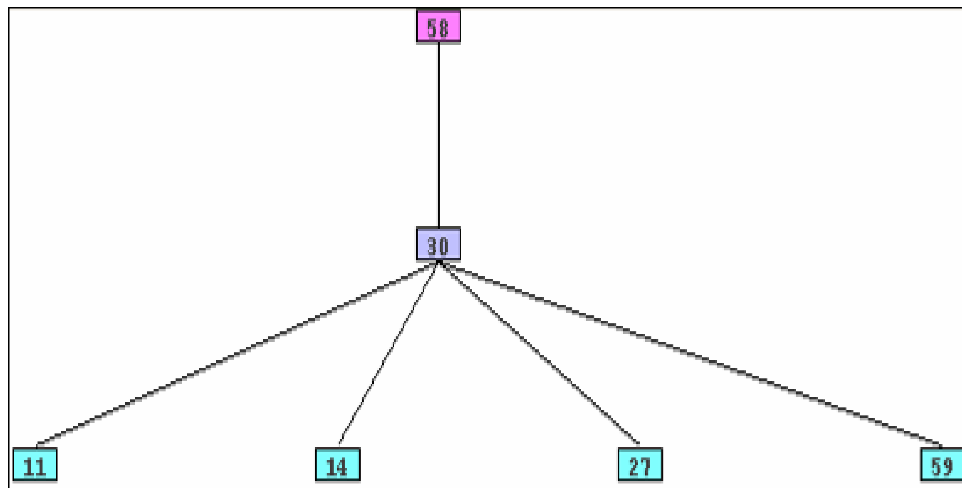


Figure 99. Graphe de sur classement avec une exigence forte sur la réduction des besoins en chauffage (note comprise entre 8 et 9) et l'amélioration du confort d'été (indice compris entre 40 et 49) pour le logement collectif à Marseille

A Marseille (Figure 99), en priorisant les besoins de chauffage et l'indice de confort d'été, le classement suivant est obtenu :

- Fenêtres performantes + Isolation transparente + Ventilation naturelle + Inertie (solution 58)
- Fenêtres performantes + Volets+ Isolation transparente + Ventilation naturelle (solution 30)
- Calfeutrement + Fenêtres performantes + Isolation transparente (solution 11) ou Fenêtres performantes + Volets+ Isolation transparente (solution 14) ou Calfeutrement + Fenêtres performantes + Isolation transparente + Ventilation naturelle (solution 27) ou encore Calfeutrement + Fenêtres performantes + Isolation transparente + Ventilation naturelle + Inertie (solution 59).

Les combinaisons de solutions proposées par REFLEX-*Bio* répondent bien aux priorités préconisées par les plans d'expériences.

Un critère mériterait d'être exploité dans cet outil : c'est l'éclairage naturel. En effet, l'éclairage fait partie des stratégies bioclimatiques. Cette intégration fait partie des perspectives d'évolutions proposées.

9. CONCLUSION GENERALE

Afin de situer le contexte de cette étude, le lecteur pourra se référer à l'actualité : une semaine ne passe sans que les médias ou la communauté scientifique ne fassent référence aux changements climatiques et à l'implication de l'homme dans ce processus (transport, énergie et bâtiments particulièrement).

Le respect de l'engagement de Kyoto passe par une réduction des gaz à effet de serre d'un facteur 4 en France. Les objectifs correspondants ont été fixés et notamment dans le secteur des bâtiments résidentiels existants dont la rénovation constitue une priorité. Des prospections montrent que le plus grand gisement se situe au niveau de l'enveloppe. Elles distinguent par ailleurs différents niveaux de rénovation. Parmi ces niveaux, la rénovation diffuse est la plus répandue notamment le changement de fenêtres.

Le marché de la rénovation de l'habitat représente 53 milliards € en 2005. 90% des travaux sont commandés par les ménages, 8% par les organismes d'habitat social, 2% par des bailleurs personnes morales privées (Cah, 2006).

L'état de l'art réalisé a mis en exergue le manque de méthodologie permettant de définir les priorités d'interventions intégrant les solutions bioclimatiques sur l'enveloppe d'un bâtiment résidentiel existant. En outre, les solutions bioclimatiques, bien que largement développées sous l'aspect architectural, sont rarement analysées sous l'angle thermique au niveau de ce type de bâtiment. Quelle démarche adopter quand on souhaite rénover un bâtiment en y intégrant des solutions bioclimatiques ?

Au préalable les solutions pouvant s'intégrer sur un bâtiment existant sont identifiées en fonction du niveau de rénovation. Ces dispositifs découlent d'une étude approfondie des stratégies climatiques indissociables des systèmes pour atteindre les objectifs fixés. Ces stratégies remettent au goût du jour le bon sens perdu durant notamment les Trente glorieuses qui ont vu l'émergence de bâtiments « énergivores » à cause, principalement, du faible coût de l'énergie à cette époque.

Nous avons proposé une méthodologie permettant la détermination des facteurs importants d'un bâtiment et l'association de solutions bioclimatiques appropriées : c'est la méthodologie experte par les plans d'expériences (MEXPER) qui permet d'identifier les priorités d'interventions sur l'enveloppe du bâtiment et qui peut s'appliquer à n'importe quel bâtiment existant. Les plans d'expériences ayant l'avantage de permettre la mise en œuvre d'une stratégie de travail dans le but de réduire le nombre de simulations tout en atteignant rapidement les réponses aux questions posées.

Notre objet a été de déterminer l'influence des éléments du bâtiment (fenêtres, murs, toiture, plancher, ventilation) sur les indicateurs (besoins en chauffage et un indice de confort d'été). Une application de cette phase a été d'apprécier le choix préalable des indicateurs. Ainsi, nous avons pu constater qu'en terme de confort d'été, l'approche adaptative, qui utilise les résultats des champs d'études empiriques pour analyser les interactions entre les conditions thermiques et le comportement des usagers, est plus appropriée pour des bâtiments utilisant des stratégies de ventilation naturelle que celles de Fanger (adéquate pour des vitesses faibles et des systèmes actifs).

La méthodologie se décline en plusieurs phases qui vont du diagnostic du bâtiment existant suivi de l'identification des facteurs par l'homme d'études dont le nombre dicte les simulations à réaliser selon le plan d'expériences retenu. Les résultats de ces simulations sont alors renseignés dans l'outil de plans d'expériences qui indique alors les effets de la variation des différents facteurs sur les indicateurs retenus. Les solutions bioclimatiques sont identifiées parmi les suivantes : fenêtre, serre, mur capteur accumulateur, puits canadien, ventilation nocturne, matériaux à changement de phase et matériaux à isolation transparents.

Le dimensionnement de certaines de ces solutions (serre, mur capteur accumulateur, TIM) peut être optimisé. On a pu apprécier le fait que les méthodes d'optimisation constituent un outil performant pour le dimensionnement et l'amélioration des systèmes. Ceci étant, il est possible de réaliser une étude plus pointue sur l'optimisation des systèmes notamment par l'ajout de coefficients de pondération sur les critères retenus. Ceci aurait amené à plusieurs solutions en fonction des coefficients de pondération.

MEXPER est appliquée sur deux bâtiments de référence choisis sur deux périodes de construction estimées intéressantes du fait qu'elles correspondent aux périodes les plus énergivores :

- pour les logements anciens, un logement collectif de 1900 construit en milieu urbain est retenu (les logements collectifs construits avant 1948 étant les plus énergivores)
- pour les édifices d'après-guerre : une maison individuelle de 1966 en milieu rural (la période de construction des maisons individuelles consommant le plus d'énergie se situant entre 1949 et 1974).

Deux zones géographiques sont considérées : Lille avec un climat océanique et Marseille qui dispose d'un climat méditerranéen. Les applications s'appuient certes sur des logiciels spécifiques tels que TRNSYS pour la simulation thermique dynamique, Nemrod pour les plans d'expériences, TRNOPT pour l'optimisation, elles peuvent être néanmoins employées avec des outils ayant les mêmes finalités. Prenons le logiciel d'optimisation : il est basé sur Genopt utilisable avec d'autres logiciels de simulation thermique dynamique tels que : Energyplus, DOE2. De même que n'importe quel logiciel de plans d'expériences peut être utilisé. Ainsi, certains auteurs ont développé leur code pour appliquer la méthodologie des plans d'expériences. De fait, en amont, le choix du logiciel de simulation dynamique est assez souple (il doit néanmoins considérer le couplage des phénomènes étudiés).

Des études spécifiques ont été réalisées pour intégrer des caractères inhérents aux bâtiments existants comme le comportement thermique des parois épaisses ou encore la prise en compte des phénomènes d'humidité dans TRNSYS. En revanche, vue l'analyse experte sous-jacente à ce travail, cette méthodologie à plutôt dessein à être appliquée dans un bureau d'études ou encore dans un laboratoire de recherche et développement.

Son avantage évident est qu'il est possible d'y adjoindre n'importe quel dispositif climatique que l'on souhaite utiliser, si tant est qu'une modélisation de ce dernier soit disponible. L'objectif de ce travail n'ayant pas été de créer des solutions bioclimatiques, mais de voir celles qui correspondent au mieux à un bâtiment existant.

Ces applications montrent que, si pour réduire les besoins en chauffage des « solutions universelles » (indépendantes de la zone géographique) semblent se détacher (telles que l'installation de fenêtres performantes, de matériaux d'isolation transparents ou encore l'isolation de la toiture), en ce qui concerne l'amélioration du confort d'été, il en est autrement, des phénomènes d'interactions pouvant être prépondérants. Par ailleurs, certaines combinaisons de solutions permettent d'atteindre voire de dépasser le facteur 4 !

Ainsi, dans la zone méditerranéenne, les solutions réduisant les besoins de chauffage doivent s'accompagner de dispositifs favorisant la stratégie de froid tels que les protections solaires, l'adjonction de MCP ou encore l'installation d'un puits canadien (cas de la maison individuelle). Les différentes solutions préconisées selon la zone géographique sont ensuite comparées. Les solutions représentant un bon compromis entre la réduction des besoins en chauffage et l'amélioration du confort d'été peuvent être alors relevées.

Par MEXPER, l'installation de fenêtres performantes et de TIM associés à des solutions adéquates dans la zone méditerranéenne se détache des autres dispositifs quand on considère comme réponse les besoins de chauffage et l'indice de confort d'été.

Si l'on souhaite intégrer d'autres indicateurs tels que le coût de la solution proposée ou encore les nuisances induites par les travaux, de quoi dispose-t-on pour comparer ces réponses ?

Pour un nombre limité de réponses, les plans d'expériences conviennent. Quand on souhaite comparer plusieurs critères (plus de deux), il est possible d'appliquer une approche de la famille des outils d'analyse multicritères qui consiste à réaliser un surclassement de synthèse. Dans la démarche intellectuelle des outils d'aide à la décision, il est au préalable nécessaire de repérer les actions efficaces. Ce premier tri peut être effectué par la méthodologie MEXPER que nous avons mise au point.

D'autres critères (coût de l'opération, évaluation des besoins en refroidissement, qualité environnementale, nuisance des travaux, confort d'hiver, qualité de l'air) sont alors évalués. Pour ce faire, nous avons développé un outil d'aide à la décision, REFLEX-*Bio* (Rénover Efficacement les logements existants par des solutions bioclimatiques). Grâce à cet outil, le décideur peut alors choisir des solutions bioclimatiques identifiées par la méthodologie MEXPER. Une application de cet outil est illustrée pour le logement collectif de 1900.

Certains critères comme la qualité environnementale mériteraient d'être approfondis une fois que les fiches environnementales et sanitaires des solutions seront disponibles. D'autres devraient être intégrés : c'est le cas de l'éclairage naturel.

Des solutions préconisées, la fenêtre est récurrente pour des typologies et des climats différents. Rappelons que c'est le dispositif généralement installé pour des raisons économiques. Dans les ouvrages architecturaux, il est prôné comme étant la solution bioclimatique par excellence.

Au-delà des performances thermiques des systèmes, l'installation de ces solutions et la prise en compte des phénomènes environnementaux amènent une réflexion de type sociologique qui souligne le caractère inter disciplinaires de cette problématique. A titre d'illustration, si on considère l'installation d'une serre : elle sert certes d'espace tampon, mais elle agrémente le quotidien d'une surface supplémentaire dans laquelle il est possible d'installer des plantes. Elle peut procurer par ailleurs une vue plus grande sur l'extérieur contribuant ainsi à l'amélioration du cadre de vie. Ce dernier point peut constituer un critère à intégrer dans l'outil proposé. Pour ce faire, une étude sociologique peut être nécessaire.

Compte tenu de l'étendue et de la complexité de la problématique, des choix ont été nécessaires. La mise en place d'une méthodologie a été privilégiée par l'efficacité qu'elle présente. Toutefois, certains écueils ont été rencontrés. Nous pensions en effet au départ pouvoir proposer des organigrammes décisionnels en termes d'interventions sur le bâtiment construit, pour n'importe quel édifice. Force a été de constater la difficulté de dresser une typologie quantitative des bâtiments construits avant 1975 en France, étant donnée la régionalisation des types de construction durant cette période (notons que durant la rédaction de ce manuscrit, nous apprenons que le rapport sur les typologies réalisé par Energies Demain commandé par la DGUHC vient d'être finalisé et recense quelques 2000 typologies, c'est dire que le sujet est primordial !). Ceci étant, sur les analyses qualitatives

existantes, le choix de bâtiment de référence a été réalisé et permet de dresser une méthode de travail applicable à d'autres bâtiments. Néanmoins, l'objectif final d'EDF étant de réaliser un guide prescriptions à la rénovation bioclimatique, cette méthodologie peut servir de base pour définir des solutions génériques. Pour ce faire, il est utile de l'appliquer sur toutes les typologies recensées dans le rapport précité. Cette application peut être réalisée par les réseaux de neurones.

Au niveau des plans d'expériences, l'intégration d'autres facteurs est tout à fait possible en terme de perspectives d'évolution. Ainsi, des stratégies spécifiques de régulation des solutions telles que la serre, la ventilation nocturne, le mur capteur accumulateur ou encore le puits canadien mériteraient une attention particulière. Au-delà de la régulation, l'intégration de systèmes actifs ou encore hybrides constituerait une avancée conséquente dans la perception de la plénitude du système « bâtiment ». Afin de rester dans la philosophie de la démarche il pourrait être intéressant de considérer les énergies renouvelables comme les panneaux photovoltaïques, l'eau chaude solaire, les capteurs hybrides, les planchers solaires directs par exemple. Elles pourraient tout à fait constituer des bornes des plans d'expériences. D'ailleurs une étude similaire, (Filfi, 2006), a intégrée sur des bâtiments tertiaires des solutions dites « isolation » et des systèmes actifs favorisant notamment le rafraîchissement des locaux en été.

Ce que l'on retiendra de cette étude, c'est que chaque bâtiment existant est un cas particulier dépendant de ses caractéristiques intrinsèques (matériaux utilisés, morphologie), mais également, et c'est un paramètre fondamental dans cette approche, de son environnement : milieu rural, urbain par exemple, mais aussi de la végétation, des facteurs météorologiques. Pour une modélisation se rapprochant au mieux de la réalité, le comportement thermique des matériaux composant les bâtiments anciens devrait être intégré. En effet, les performances des éléments se dégradant avec le temps, ce phénomène pourrait être considéré par le biais d'un facteur de dégradation.

Le bâtiment est à lui seul un système qui est composé de sous-ensembles que nous avons appelé facteurs. Chaque sous-ensemble est caractérisé par de nombreux paramètres définis par leurs propriétés thermo physiques. L'ajout d'un système tel que la serre ou le puits canadien ne s'improvise pas et souligne la complexité à définir des solutions clé en main pour n'importe quel bâtiment. Pour rependre la métaphore de l'état de l'art (cf. 2.1) la solution universelle consisterait à préconiser des oligoéléments, une alimentation équilibrée et des activités sportives en prétraitement et l'étude de solutions bioclimatiques une ordonnance spécifique en fonction de la maladie décelée. Le comportement du bâtiment dépend de paramètres intrinsèques de son enveloppe, mais également de son environnement et de ses occupants. La prise en compte de l'environnement nécessite une analyse de site précise (diagramme de masques, vents dominants, climat, végétation, gisement solaire). Cependant, un degré supérieur serait la prise en compte du microclimat, le développement de l'architecture bioclimatique passant nécessairement par une meilleure connaissance des processus climatiques qui engendrent des réponses déterminées des bâtiments. En réalité, l'homme d'études devra porter une attention particulière aux aspects environnementaux et de microclimat. La difficulté étant de concilier ces paramètres à l'outil de simulation retenu.

Par ailleurs, en terme de conception bioclimatique, un système peut disposer de très bonnes performances, mais si son utilisation ne s'accompagne pas d'une sensibilisation (pour ne pas parler d'éducation) correcte des occupants, on peut noter de sérieux dysfonctionnements. Les hypothèses comportementales sont donc primordiales. Elles ont été également intégrées par le biais de l'ouverture des fenêtres et l'utilisation possible des volets.

En outre, en terme sémantique, pourquoi avons-nous employé « bioclimatiques » et non solutions « durables ». Parler d'architecture durable sous-tend de dépasser les simples aspects énergétiques et de confort, et d'aller dans l'analyse du cycle de vie du bâtiment. Cette procédure est encadrée (normes ISO 14062, XP P 01-010 (Afnor, 2004) par exemple) et des outils spécifiques sont développés. En revanche, les données environnementales et sanitaires n'existent que pour des produits spécifiques et pas pour toutes les solutions proposées dans cette étude (ex. la paraffine dans les matériaux à changement de phase). D'aucuns diront que nous sommes aujourd'hui à l'heure durable et que l'ère bioclimatique est dépassée. Le choix sémantique a été délibéré. L'outil proposé, qui intègre des aspects économiques, énergétiques et environnementaux, prendra sa dimension durable dans son exploitation, lorsqu'il placera le décideur, par rapport aux limites et aux imperfections. L'objectif étant de servir l'environnement et la société en les perturbant le moins possible.

BIBLIOGRAPHIE

(Ademe, 2003) Mise en place de protections solaires fixes ou mobiles sur les façades exposées, Fiche ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie), http://www2.ademe.fr, 2003

(Ademe (1), 2004) Bâtiment et Démarche HQE, Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie, 2004

(Ademe, 2004) Utilisation des matériaux à changement de phase en climatisation passive d'été et chauffage d'intersaison, Convention ADEME n° 04 04 C 0073, Notifiée le 28/12/2004

(Ademe, 2005) Les chiffres clés du bâtiment http://194.117.223.129/servlet/getDoc?id=16929, janvier 2005

(Ademe, 2006) Le diagnostic de performance énergétique, http://www2.ademe.fr/servlet/KBaseShow?sort=-1&cid=96&m=3&catid=15028, 2006

(Ademe (1), 2007) Faites respirer votre maison avec la ventilation, http://www2.ademe.fr/servlet/KBaseShow?sort=-1&cid=96&m=3&catid=15028, 2007

(ADEME, 2007) Mur capteur – accumulateur. ADEME, http://www2.ademe.fr/servlet/KBaseShow?sort=-1&cid=96&m=3&catid=15040, 2007

(Afnor, 2003) Verre dans la construction : détermination des caractéristiques lumineuses et solaires des vitrages – Norme NF EN 410 - Association Française de Normalisation, 2003

(Afnor, 2004) NF P01-010 Qualité environnementale des produits de construction - Déclaration environnementale et sanitaire des produits de construction, Décembre 2004

(Afnor, 2007) Critères d'ambiance intérieure pour la conception et l'évaluation de la performance énergétique des bâtiments couvrant la qualité de l'air intérieur, la thermique, l'éclairage et l'acoustique. Association française de normalisation, Norme européenne, Norme française NF EN 15251, 2007

(Ahmad, 2004) Nouveaux composants actifs pour la gestion énergétique de l'enveloppe légère des bâtiments. Couplage matériaux à changement de phase, Super isolation, Apports solaires. M. Ahmad, Thèse de doctorat de l'Université Joseph Fourier de Grenoble 1, 2004

(AIE, 2008) Task 37 - Advanced Housing Renovation with Solar and Conservation, Agence Internationale de l'Energie, http://www.iea-shc.org/task37/index.html, 2008

(AIVC, 1987) Technical note AIVC 20. Airborne moisture transfer: New Zealand Workshop. Proceedings and Bibliographic Review. Berkshire (RU) : AIVC, 1987

(Ambassade, 2004) Caractéristiques thermiques des matériaux locaux de construction - Cas de la brique en terre cuite, Ambassade de France au Maroc, http://www.ambafrance-ma.org/archives/marocweb/projet04/sesmec6.htm, 2004

(Anah, 2004) Humidité, Agence Nationale pour l'Amélioration de l'Habitat, 2004

(Architecture et Climat, 2005) Guide de l'éclairage naturel des bâtiments : la stratégie de lumière naturelle – Cellule Architecture et Climat de l'Université Catholique de Louvain, http://www-energie.arch.ucl.ac.be/eclairage/guide_strategies.htm, 2005

(Architecture et Climat, 2005) Les parois transparentes – La stratégie de lumière naturelle, cellule « Architecture et climat »de l'Université Catholique de Louvain, 2005

(Arene, 1999) Nouvelles solutions dans l'énergie : Caractéristiques pour un bâtiment méditerranéen, ARENE Agence Régionale de l'Energie Provence-Alpes-Côte d'Azur, avec l'aide de la Commission Européenne, 1999

(Ashrae, 2001) ASHRAE Handbook, Fundamentals, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Atlanta 2001

(Aspo, 2007) Association for study of peak oil, http://www.peakoil.net, 2007

(Athienitis et al, 2002) Thermal Analysis and Design of Passive Solar Buildings, Ahienitis A.K and Santamouris, Ed. James and James, 2002

(Audience, 2006) Projet européen de télé formation des architectes à la maîtrise des ambiances, http://audience.cerma.archi.fr, 2006

(Aulagnier et al, 2005) Bâtiment et effet de serre : Le chantier de l'isolation dans les bâtiments existants, Aulagnier S., Couturier B., Greffier T., Perrin JF., Atelier Changement Climatique, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, http://www.enpc.fr/fr/formations/ecole_virt/trav-eleves/cc/cc0405/batiment.doc#_Toc96784165; 2005

(Azar et al, 2007) Rénovation et Efficacité énergétique : Approche Multicritères, Azar S., Baltus C., Hauglustaine JM, . Contrat LAPT (ULg) – EDF, Réf. 4300015759, Logiciel REFLEX (Rénovation Efficace d'un Logement EXistant), Université de Liège, Juillet 2007

(Baltus et al, 2003) Types de châssis - Catherine BALTUS et Jean-Marie HAUGLUSTAINE (LEMA, Département d'Architecture et d'Urbanisme, Université de Liège) - Région Wallonne, Réalisation : Institut Wallon asbl - Boulevard Frère Orban, 4 - 5000 Namur, 2003

(Beckman, 1971) 'The Solution of Heat Transfer Problems on a Digital Computer', Beckman W.A., Solar Energy, 13,3, 1971

(Becq, 2007) Une réglementation thermique des bâtiments existants…un premier pas timide, Becq S., http://www.amisdelaterre.org/Une-reglementation-thermique-des.html, 2007

(Berges, 1986) 'Analyse d'un Comportement Conductif de l'Enveloppe d'un Bâtiment - Recherche de Modèles de Transfert Adaptés au Couplage Enveloppe – Equipement Régulation', B. Berges, Thèse de Doctorat, Université de Nice, 1986.

(Birraux et al, 2001) Rapport de MM. Claude Birraux et Jean-Yves Le Déaut, au nom de l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques, sur l'état actuel et les perspectives techniques des énergies renouvelables, http://www.assembleenationale.fr/rap-oecst/energies/r3415.asp, 2001

(Blugeon, 2002) 'Energie, le puits canadien : un climatiseur naturel', Blugeon JP, La Maison Ecologique N°10, 2002

(Bodart, 2002) Création d'un outil d'aide au choix optimisé du vitrage du bâtiment selon des critères physiques, écologiques et économiques, pour un meilleur confort visuel et thermique, Bodart M., Thèse de doctorat, UCL, Avril 2002

(Bonvin et al, 1997) 'Transformation du Château de Valère en musée. Installations techniques : évaluation des besoins', Bonvin M., Duc P.-J, Rapport et annexes, Ecole d'ingénieurs du Valais, Sion, 1997

(Bottema, 1992) Wind climate and urban geometry, Bottema M., Technische Universiteit Eindhoven p. 212, 1992

(Box et al, 1978) Statistics for Experimenters, an Introduction to Design, Data Analysis and Model Building – Box G. E. P., Hunter W. G., Hunter J. S - Ed. John Wiley, New York - 1978.

(Boyd, 1964) Le vent sur les bâtiments - W.A. DALGLIESH, D. BOYD - Institut de recherche en construction du Canada - 1964

(Brown et al, 1988) Facteurs de performance des fenêtres, Brown W. C etRuberg K., Institut de recherche en construction du Canada, 1988

(Cah, 2006) Club de l'amélioration de l'habitat, « Marché de l'amélioration de l'habitat ». p.1., Février 2006.

(Catmull et al, 1974) A class of local interpolating splines, in Barnhill, Rad R. Riesenfeld, (eds), Computer Aided Geometric Design, Catmull 1974, Rom R., Academic Press San Francisco, pp317-326, 1974

(Cen, 2006a) EN 15217 Energy Performance of Buildings – Method for expressing Energy Performance and for Energy Certification of Buildings, Brussels, CEN, 2006

(Cen, 2006b) EN 15603 Energy Performance of Buildings – Assessment of Energy Use and Definition of Energy Ratings, Brussels, CEN, P.50, 2006

(Ceren, 2004) Consommations moyennes d'énergie régionales distinguant l'usage chauffage: exploitation particulière de l'enquête logement 2001-2002 / Secteur résidentiel - Etude 4105 - CEREN Centre d'études et de recherches économiques sur l'énergie – Juillet 2004

(CETE, 2005) Développement Durable dans les Constructions Publiques, CETE, Centre d'Etudes Techniques de l'Equipement, http://www2.urbanisme.equipement.gouv.fr/actu/ip/n6/textes/fiche_puits_canadien2005_12_09.pdf, 2005

(Chung et al, 1999) 'Semi-analytical solution for heat transfer from a buried pipe with convection on the exposed surface', Chung M., Jung P.S., H. Rangel R., International Journal of Heat and Mass Transfer, n°42, pp.3771-3786, 1999

(CLIP, 2001) Les cahiers du CLIP (Club d'Ingénierie Prospective Energie et Environnement), Habitat et développement durable : Bilan rétrospectif et prospectif, Numéro 13, Avril 2001

(CNIDEP, 2007) Nouveaux isolants thermiques, http://www.cnidep.com/D405.pdf, 2007

(CNISF, 2007) Bâtiments et Maîtrise de l'Energie, Conseil National des Ingénieurs et des Scientifiques de France, http://www.cnisf.org/biblioth_cnisf/dossiers_CNISF/Batiments_et_economies_energie.pdf, 2007

(Collard et al, 1996) Guide d'aide à la rénovation bioclimatique, Collard B., Nihoul A., De Herde A., Lesens N., Ministère de la Région Wallonne DGTRE Division Energie et Université Catholique de Louvain (Faculté des Sciences Appliquées Architecture et Climat), 1996

(Concerto, 2006) L'initiative Concerto, http://concertoplus.eu/CMS/component/option,com_frontpage/Itemid,239, 2006

(Conseil_europeen, 2002) Directive 2002/91/CE du Parlement Européen et du Conseil du 16 décembre 2002 sur la performance énergétique des bâtiments, Journal officiel des Communautés Européennes, 2002

(Courgey et al, 2006) La conception bioclimatique: des maisons confortables et économes en neuf et en réhabilitation, Courgey S., Oliva JP., Edition Terre Vivante, 2006

(Cstb, 1980) Coefficients K des parois des bâtiments anciens, Cahiers du CSTB, 1980

(CSTB, 2006) Présentation du logiciel Meteonorm, Centre Scientifique et Technique du Bâtiment, http://software.cstb.fr/soft/present.asp?page_id=fr!meteonorm, 2006

(Daskalaki, 1995) Predicting single sided Natural ventilation rates in Buildings, Daskalaki, SolarEnergy Vol 55 No.5 pp 327-341, 1995

(De Dear et al, 2002) Thermal comfort in naturally ventilated buildings: Revisions to ASHRAE Standard 55. De Dear R. et Brager G. Energy and Buildings 34, 549-561, 2002

(Denance, 2004) Fenêtres et portes extérieures bois : Analyse thermique. Choix du bois, Denance M., Techniques de l'ingénieur, 2004

(Deoux, 2004) Le guide de l'habitat sain, Déoux S. et P., Habitat Qualité et Santé : pour bâtir une « santé durable », Medieco Editions, 2004

(De Paepe et al, 2003) 'Thermo-hydraulic design of earth-air heat exchangers', De Paepe M., Janssens A., Energy and Buildings, n°35, p.389-397., 2003

(Dereymez, 2007) Le Tournesol: un bâtiment à haute efficacité énergétique, Dereymez C., Projet transversal individuel de l'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon encadré par Roux JJ., 2007

(Derivaz, 2000) 'Musée de Valère : optimisation de la gestion technique centralisée', Derivaz J., Diplôme, Haute Ecole valaisanne, Sion, 2000

(Desombre, 2005) J'attends une maison – François DESOMBRE –Le livre de l'habitat écologique - Edition 2005

(DGEMP, 2007) La mise en œuvre des certificats d'économies d'énergie : un nouvel outil pour inciter les Français à économiser l'énergie, Ministère de l'Économie, des Finances et de l'Emploi, http://www.industrie.gouv.fr/energie/developp/econo/cee-sommaire.htm, 2007

(Dorer, 2001) Users Guide of COMIS 3.1, 2001

(Duforestel et al, 1994) A model of hygroscopic buffer to simulate the indoor air humidity behaviour in transient conditions, Duforestel T., Weber A. Proceedings of European Conference on Energy Performance and Indoor Climate in buildings. Lyon, France, 1994

(Dupont, 2007) DuPont™ MCP : Matériau à Changement de Phase, http://fr.news.dupont.com/site/contenu.asp?idtri=1530&idcontenu=55612, 2007

(EASE, 1994) EASE, Education of Architects in Solar Energy Environment, Altener Project, European Commission DG TREN, http://www-cenerg.ensmp.fr/ease/index.html , 1994

(Ekopedia, 2007) Puits canadien, http://fr.ekopedia.org/Puits_canadien, 2007

(Energie Cités, 2003) Quantification des émissions de gaz à effet de serre à l'échelle territoriale, Rapport Final, Energie Cités, http://www.energie-cites.eu/IMG/pdf/quantification_territoriale_ges.pdf, 2003

(Energy Agency, 2007) Keep Cool, Sustainable summer comfort: Comfort models, www.energyagency.at/publ/pdf/keepcool_freport.pdf, 2007

(Enertech, 2007) Amélioration thermique de l'habitat existant : Rénovation du quartier Franklin à Mulhouse, Société Enertech, Présentation dans le cadre des « Ateliers » de l'Agence Locale de l'Energie de Lyon, 2007

(EnviroBat, 2007) Analyse de la certification de performance énergétique EFFINERGIE, http://www.envirobat-med.net/IMG/pdf/Analyse_certification_Effinergie.pdf, 2007

(Equip'baie, 2004) Les marches de la baie, Etude prospective 2005-2010, Equip'baie, Reed Exhibitions, 2004

(Ero-Energies, 2007) La solution Hélios pour le puits canadien, http://www.ero-energies.com, 2007

(EurLex, 2003) Directive 2002/91/CE du Parlement européen et du Conseil du 16 décembre 2002 sur la performance énergétique des bâtiments, http://eur-lex.europa.eu, 2003

(European Commission, 1997) Bioclimatic Architecture, THERMIE Programme Action N° DIS-0162-95-IRL, Directorate General for Energy (DG XVII), European Commission 1997

(FFB et al, 2004) Amélioration énergétique des bâtiments existants : les bonnes solutions. Fédération Française du Bâtiment (FFB), Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME) et le Comité Scientifique et Technique des Industries Climatiques (COSTIC). Collection recherche développement métier, 2004

(Filfi, 2006) Optimisation des bâtiments / système pour minimiser les consommations dues à la climatisation, Filfi S., Thèse de doctorat de l'Ecole des Mines de Paris, 2006

(Flory-Celini et al, 2005) Etude de l'influence d'un bâtiment voisin sur les éclairements énergétiques et lumineux reçus par un vitrage, Flory-Celini C., Virgone J., Covalet D., Cisbat 2005

(Flory-Celini et al, 2006) Flory-Celini C.,Safer N., Virgone J., Covalet D, Roux JJ., Réhabilitation des bâtiments : Impact de la combinaison des protections solaires et des vitrages en fonction de l'orientation, Ibpsa 2006

(Flory-Celini et al (1), 2007) Flory-Celini C., Virgone J., Covalet D., Lips B., Optimization of refurbishment choices of a building by the use of the experimental design concepts, Clima 2007

(Flory-Celini et al (2), 2007) Flory-Celini C., Varet G.,Virgone J., Covalet D., Comparison of the thermal performances of buried pipe system and night ventilation on residential buildings, Cisbat 2007

(Flory-Celini, 2008) Les stratégies bioclimatiques : état de l'art et perspectives, Flory-Celini C., Rapport de synthèse, 2008

(Franquart, 1988) L'approche japonaise de la qualité, Franquart P., Université d'Aix-Marseille III, 1988

(Gandemer, 1979) Analyse du phénomène vent en milieu bâti : Quelques prescriptions pour les architectes et les urbanistes, Gandemer J., Actes de colloques Architecture climatique, Collioure, Ed. Plan Construction, 1979

(Ghosal et al, 2005) 'Modelling and parametric studies for thermal performance of an earth to air heat exchanger integrated with a greenhouse', Ghosal M.K., Tiwari G.N., Energy conversion and management, 2005

(Gidel, 2001) Comportement et valorisation des graves non traitées calcaires utilisées pour les assises de chaussées souples, Gidel G., Thèse de l'université de Bordeaux I, Ecole doctorale des sciences physiques et de l'ingénieur, 2001

(Giec, 2007) Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat, http://www.ipcc.ch, 2007

(Givoni, 1978) L'homme, l'architecture et le climat - GIVONI B. - Ed. du Moniteur , 1978

(Givoni, 1991) Performance and applicability of passive and low-energy cooling systems – B. GIVONI - Energy and buildings, Vol. 17, p. 177 à 199, 1991

(Gratia, 1998) Aide théorique Opti-Maisons, E. Gratia, Architecture et Climat, Université catholique de Louvain, 1998

(Gratia et al, 2001) A simple design tool for the thermal study of dwellings, Gratia E., De Herde A., Energy and Buildings, 2001

(Graulière, 2005) Typologie des bâtiments d'habitation existants en France : Synthèse des caractéristiques des bâtiments d'habitation existants permettant l'évaluation du potentiel d'amélioration énergétique, Graulière P., Rapport de synthèse pour le Ministère de l'Equipement, des transports, du Logement, du Tourisme et de la mer, 2005

(Grosso, 1995) CPCALC+, Calculation of wind pressure coefficients on buildings, Software from Polytechnic University of Turin, 1995

(Guenoun et al, 1980) "Des serres pour habiter", Guenoun G., Kalmanowitch JC., Collection Les guides de la maison, Editions du Moniteur, 1980

(Gustafsson et al, 1986) Renovation of Dwellings - Life-Cycle Costs, Gustafson Stig-Inge, Karlsson Björn, Sjöholm Bertil H, CIB - 86, volume 9, pp 3886-3893, 1986

(Hauglustaine et al, 2002) La rénovation et l'énergie: Guide pratique pour les architectes, Hauglustaine JM., Simon F., Baltus C., Liesses S., Université de Liège, Ministère de la Région Wallonne, Université Catholique de Louvain, 2002

(Heidt, 2007)., http://nesa1.uni-siegen.de/index.htm?/startseite_e.htm, Heidt FD, Université de Siegen, 2007

(HQE, 2008) Existe-t-il un label HQE ?, Association Haute Qualité Environnementale, http://www.assohqe.org/autres_documents_faq.php, 2008

(Hollmuller et al, 2001) 'Transformation du château de Valère en musée : un concept énergétique répondant à de fortes contraintes', Hollmuller P., Lachal B., Weber W., Bonvin M., Cordonier P., Derivaz J., Ançay C., Proceedings de CISBAT'01, Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, 2001

(Hollmuller, 2002) 'Utilisation des échangeurs air/sol pour le chauffage et le rafraîchissement des bâtiments', Hollmuller P, Thèse de doctorat, Université de Genève, 2002

(Hollmuller , 2005) 'Rafraîchissement par geocooling : Bases pour un manuel de dimensionnement', Hollmuller P, Lachal B., Pahud D., Rapports de recherche du CUEPE N°5, Université de Genève, Centre Universitaire d'Etude des Problèmes de l'Energie (CUEPE) , 2005

(Idéesmaison, 2007) Le puits canadien, http://www.ideesmaison.com/Le-puits-canadien-ou-puits.html, 2007

(IEA, 1989) Passive and Hybrid Solar Low Energy Buildings Design Context 2, IEA, International Energy Agency, July 1989

(IEA, 1991) Condensation and Energy. Report Annex XIV, vol 1, Source book. Leuven (Belgique): International Energy Agency. Energy Conservation in Buildings and Community Systems Program, 1991

(IEA, 1997) 'Solar Energy in Building Renovation: Solar collectors, Glazed balconies, Transparent insulation', IEA, International Energy Agency, Ed. James and James, 1997

(IEA, 2005) Collection of Reports, IEA Annex 41 Subtask 1, Common Exercise 1: Case 0A & Case 0B, 2005

(Izard, 1993) Architectures d'été : Construire pour le confort d'été, Izard JL., Ed. Edisud, 1993

(Joffroy, 1999) La réhabilitation des bâtiments : conserver, améliorer, restructure les logements et les équipements – Edition Le Moniteur, 1999

(Joret et al, 1999) Vitrages à isolation thermique renforcée – Laurent JORET, Anne PROST – Techniques de l'ingénieur – 1999

(Jusselme, 2007) T. Jusselme, Les fondamentaux du bioclimatisme, http://www.envirobat-med.net/IMG/pdf/TJ-LesFondamentauxduBioclimatismeENVIROBAT.pdf , EnviroBAT méditerranée : Bâtiment et aménagement du Territoire, GEPA, Juillet 2007

(Kaklauskas et al, 2004) Multivariant design and multiple criteria analysis, of building refurbishments, Kaklauskas A., Kazimieras Zavadskas E., Raslanas S., Energy and Buiding, 2004

(Kasuda et al, 1965) "Earth Temperature and Thermal Diffusivity at Selected Stations in the United States", Kasuda T., and Archenbach P.R, ASHRAE Transactions, Vol. 71, Part 1, 1965

(Kaushika et al, 1992) Solar thermal, analysis of honeycomb roof cover system for energy conservation in an air conditioned building Kaushika, N.D., Sharma, M.S., Padmapriya, R. Energy and Buildings 18 (1), 45–49., 1992

(Kondo, 2000) Kondo T. & al., Research on the thermal storage of PCM wallboard, Workshop for international Energy Agency, Annex 10, 9 p, Japan, 2000

(Kumar et al, 2006) 'Heating and cooling potential of an earth-to air heat exchanger using artificial neural network', Kumar R., Kaushik S.C., Garg S.N., Renewable Energy, n°31, p.1139-1155, 2006

(Kummert, 2007) USING GENOPT WITH TRNSYS 16 AND TYPE 56, Kummert M., ESRU – University of Strathclyde, http://sel.me.wisc.edu/trnsys/demos/genopt-type56.pdf, 2007

(Kuznik *et al*, 2006) Compréhension des effets de l'inertie thermique : cas des parois contenant des matériaux à changement de phase (MCP), F. Kuznik, J. Virgone, J. Noel, R.Reisdorf, Annales du Bâtiment et des travaux publics, décembre 2, 8p, 2006

(Lachal et al, 1992) 'Transformation du Château de Valère en musée. Effet du nouveau climat intérieur sur le bâtiment', Lachal B., Weber W., Rapport préliminaire, CUEPE, Université de Genève, 1992

(Lachal et al, 1993) 'Transformation du château de Valère. Effets climatiques de la nouvelle exploitation', Lachal B., Hollmuller P., Weber W., Rapport final, CUEPE – Université de Genève, 1993

(Lachal et al, 1995) PASCOOL / Aymon building, in Pascool Electronic Metahandbook : passive cooling design and guidelines for mediteranean climate & countries, Lachal B., Gallinelli P., Hollmuller P.,CD-Rom, eds. W. Weber, B. Lachal, H. Drexler, Galinelli P., Gonzalez D., CUEPE – Université de Genève, 1995

(Laponche, 2004) « Maîtriser la consommation de l'énergie » Bernard LAPONCHE, Ed. Le Pommier, 2004

(Larousse, 2000) Petit Larousse en couleurs, Dictionnaire, Librairie Larousse, 2000

(Le Corbusier, 1957) La Charte d'Athènes, Le Corbusier, Editions de Minuit, 1957

(Les amis de la terre, 2007) Rénovation thermique de mon logement : Besoins d'aide, Les amis de la Terre, www.amisdelaterre.org, 2007

(Le Nouvel Observateur, 2007), Grenelle de l'environnement: quelques propositions consensuelles, mais statu quo sur le nucléaire et les OGM, AP | 27.09.2007 | 17:25

(Liébard et al, 2005) Traité d'architecture et d'urbanisme bioclimatiques, Liébard A., De Herde A., Édité par Observ'ER, 2005

(Lucas, 2001) Développement et validation de modèles thermo hydriques dans les bâtiments : Influence de la condensation et des systèmes de traitement d'air couplés aux bâtiments, Lucas F, Thèse de doctorat de l'Université de La Réunion, 2001

(Manicore, 2007) Climat, énergie, et quelques milliards d'hommes ..., Jancovici JM., http://www.manicore.com/, 2007

(Mansouri, 2003) Conception des enveloppes des bâtiments pour la ventilation naturelle. Mansouri Y. Thèse de doctorat au Cerma de Nantes, 2003

(Marco, 2005) Seminar on phase change materials and innovation products, Marco I. Brianza Plastica. Beijing, China, Tsinghua University, October 20, 2005

(Maystre et al, 1994) Méthodes Multicritères ELECTRE : Description, conseils pratiques et cas d'application à la gestion environnementale – Maystre L., Pictet J., Simos J. – Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 1994

(Mazria, 1979) Le guide de la maison solaire, Mazria E., Ed. Parenthèses, 1979

(Mazria, 1981) Le guide de l'énergie solaire passive – Edward MAZRIA – Edition Parenthèses, 1981

(Mies, 2005) Emissions de gaz à effet de serre, Mission Interministérielle de l'effet de serre, http://www.effet-de-serre.gouv.fr/fr/emissions/inventaire.htm, 2005

(Miguet, 2000) Paramètres physiques des ambiances architecturales: un modèle numérique pour la simulation de la lumière naturelle dans un projet urbain. Miguet F., Thèse de doctorat. Ecole Polytechnique de l'Université de Nantes, 2000

(Mihalakakou, 2003) 'On the heating potential of a single buried pipe using deterministic and intelligent techniques', Mihalakakou G., Renewable Energy, N°2 8, pp.917-927, 2003

(Ministère de l'équipement et du logement, 1971) 164 projets types homologués, Ministère de l'équipement et du logement, Ed. Callon, Supplément à l'INFORMAT BATI-T.P. n°55., P.32-3, 1971

(Ministère du logement et de la ville, 2007) Le "diagnostic de performance énergétique", http://www.logement.gouv.fr, 2007

(Ministère de l'industrie, 2004) 20 ans de chauffage dans les résidences principales en France de 1982 à 2002. Observatoire de l'énergie, http://www.industrie.gouv.fr/energie/statisti/se_stats14.htm, Octobre 2004

(Ministère de l'Industrie, 2006), Une nouvelle régulation thermique pour le bâtiment, http://www.industrie.gouv.fr/biblioth/docu/kiosque/cahiers/cahier112-002.html, 2006

(Minnaert, 2008) Paris : Immeuble de la rue Vavin, Fiche Docomomo, Minnaert JB, http://www.archi.fr/DOCOMOMO-FR/fiche-imm-vavin.htm, 2008

(Mitalas, 1970) Comments on the Z-Transfer function method for calculating heat transfer in buildings, Mitalas G., Ashrae Transactions vol. 84 (1), p. 667-674

(Moujalled, 2007) Modélisation dynamique du confort thermique dans les bâtiments naturellement ventilés, Moujalled B., Thèse de doctorat de l'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2007

(Moye, 1980) Coefficients K des parois des bâtiments anciens, Moye C., ingénieur en chef du CSTB à la demande de l'ANAH, 1980

(Nemrod, 2006) Présentation du logiciel NemrodW, http://www.nemrodw.com/, 2006

(Observatoire de la qualité de l'air intérieur, 2004) Observatoire de la qualité de l'air intérieur: point d'étape, http://webzine.cstb.fr/archives/documents/Doc115_1.pdf, 2004

(Onpeutlefaire, 2007) Le puits canadien, http://www.onpeutlefaire.com/fichestechniques/ft-puits-canadien.php, 2007

(Orme et al, 1998) Numerical Data for Air Infiltration and Natural Ventilation Calculations – Orme, Liddament M., Wilson A. - Air Infiltration and Ventilation Centre (AIVC) – Coventry GB, 1998

(Orme et al, 2002) Ventilation modelling data guide, AIVC Guide 5, INIVe on behalf of the IEA, 2002

(Orselli, 2005) Recherche et Développement sur les économies d'énergies et les substitutions entre énergies dans les bâtiments, J. Orselli, Rapport pour le Conseil Général des Ponts et Chaussée, 2005

(Pacer, 1996) Architecture climatique équilibrée : Conception démarche, dimensionnement – Cours PACER – Office fédéral des questions conjoncturelles en collaboration avec le LES0, EPFL, Lausanne, 1996

(Parsons, 1983) 'The Simulation and Design of Building Attached Sunspaces', Parsons, B.K., University of Wisconsin-Madison, M.S. Thesis, 1983

(Pasanisi, 2005) Eléments d'aide multicritère à la décision, Pasanisi A., EDF R&D, Département SEVE, Note HE-14/05/005/A, Mars 2005

(Pasanisi et al, 2008) A multicriteria decision tool to improve the energy efficiency of residential buildings, Pasanisi A., Ojalvo J.,Foundations of Computing and Decision Sciences (in press), 2008

(Pedregal, 1992) Modélisation des espaces serres destinés à l'habitat, Pedregal P.D., thèse en physique des systèmes énergétiques, université Paris VII

(Pellegrino, 2007), Clim et Energie, l'équation à résoudre… Vite !, http://www.climamaison.com/conseil-chauffage-climatisation.php?T=2&Rp=173, 2007

(Peuportier, 1993) L'isolation transparente: une nouvelle technologie au service du solaire thermique, Article de Peuportier B. de l'Ecole des Mines de Paris- Journée d'études de la société française des thermiciens, 1993

(Peuportier et al, 2000) Advanced glazing and transparent insulation, Peuportier B., Kohler N., Lewis O., Tombazis A. and Voss K., Education of Architects in Solar Energy and Environment, ALTENER Project, European Commission DG TREN: http://www-cenerg.ensmp.fr/ease/index.html , 2000

(Peuportier, 2001) Réhabilitation d'un bâtiment de 52 logements à Montreuil, Rapport d'avancement de la convention ADEME – Armines, Peuportier B., Ecole des Mines de Paris, 2001

(Peuportier, 2003) Eco conception des bâtiments, bâtir en préservant l'environnement, Peuportier B., Les Presses, Ecole des Mines de Paris – 2003

(Platat, 2007) « Une industrie verte pour faire pousser le travail : Climat. La lutte contre le réchauffement créerait plus d'emplois qu'elle n'en supprimerait, selon l'Ademe », Platat S., Journal Libération, http://www.liberation.fr/actualite/economie_terre/255031.FR.php

(Prebat, 2006) Synthèse : Comparaison internationale Bâtiment et Energie, Rapport intermédiaire, ADEME/PUCA/CSTB, PREBAT, Carassus J., Visier JC, http://www.prebat.net/benchmark/synthese.pdf, 2006

(Quirouette, 2004) La pression d'air et l'enveloppe du bâtiment –QUIROUETTE R. - Société canadienne d'hypothèques et de logement, 2004

(Région Wallonne_C, 2003) Types de châssis - Région Wallonne, 2003

(Région Wallonne_V, 2003) Types de vitrage, Région Wallonne, http://www.ibgebim.be/FRANCAIS/pdf/energie/s08%20brochure01.pdf, 2003

(Regnier, 2003) Conception de systèmes hétérogènes en Génie Électrique par optimisation évolutionnaire multicritère, Regnier J., Thèse de doctorat de l'Insa de Toulouse, Spécialité Génie Electrique, 2003

(RehabiMed, 2005) Réhabiliter l'architecture traditionnelle méditerranéenne, Symposium régional Marseille, le 23, 24 et 25 de septembre 2005, Programme Rehabimed, www.rehabimed.net, 2005

(Roulet et al, 2002) ORME:A multicriteria rating methodology for buildings, Roulet C. A., Flourentzou F., Labben H. H., Santamouris M., Koronaki I., Dascalaki E., and Richalet V., Building and Environment , v. 37, p. 579-586, 2002

(Roulet, 2004) Santé et qualité de l'environnement intérieur dans les bâtiments, Roulet CA., Collection Gérer l'Environnement, Presses polytechniques et universitaires romandes,2004

(Roy et al, 1993) Aide Multicritère à la décision : Méthodes et cas, Roy B. et Bouyssou D., Collection Gestion, Ed. Economica, 1993

(Saint-Gobain, 2000) Mémento, Saint-Gobain Glass, Edition 2000

(Santamouris et al, 1996) Passive cooling of buildings, Santamouris M. and Asimakopoulos D., Ed. James and James, 1996

(Savatier, 2000) Visite des maisons solaires à Chambéry, Savatier G., Maison des Energies, Formation en énergies renouvelables et valorisation énergétiques des déchets, 2000

(Schmitz-Günther, 1999) Eco-Logis : La maison à vivre, Schmitz-Günther T., Ed. Könemann, 1999

(Sidler, 2000) Logements à faibles besoin en énergie : Guide de recommandations et d'aide à la conception, Sidler O., 2000

(Sidler, 2003) Diviser par 4 la consommation d'énergie des bâtiments : mythe ou réalité ? , Sidler O., 2003

(Siegel et al, 1981) 'Thermal Radiation Heat Transfer', Siegel, R. and Howell, J.R., McGraw-Hill, New York, 1981

(Simon et al, 1998) La fenêtre et la gestion de l'énergie, Guide pratique pour les architectes, Simon F., Hauglustaine JM– Universités Catholique de Louvain et de Liège – Ministère de la Région Wallonne, 1998

(Simsek, 2006) Modularisation et comparaison de quelques méthodes de surclassement pour le projet D2, Simsek H., Université Libre de Bruxelles, Faculté des Sciences, Département d'Informatique, 2006

(Souvay, 1995) Les plans d'expériences: Les plans Taguchi, Souvay P., Afnor Collection, A savoir, 1995

(Tareb, 2004) Intégration architecturale – Low Energy Architecture Research Unit of the London Metropolitan University – TAREB: Programme Européen DG TREN Altener , 2004

(Techno-sciences, 2007) Eco quartier, http://www.techno-science.net/?onglet=glossaire&definition=3465, 2007

(Travaux, 2007) Humidité : Dangereux pour l'habitat, dangereux pour la santé, http://www.travaux.com/dossier/humidite/index.php?dossier=25&article=47, 2007

(Trombe et al, 1977) "Concrete Walls to Collect and Hold Heat", Trombe, F., Robert, J.F., Cabanot, M., and Sesolis, B., Solar Age, Vol. 2, No. 8, pp. 13-19, Aug. 1977

(TRNFLOW, 2006) TRNFLOW Manual: A module of an air flow network for coupled simulation with Type 56 – Version 1.3 – Transsolar, 2006

(TRNSYS, 2004) A transient Simulation Program - Manual, Solar Energy Laboratory - University of Wisconsin – Madison, 2004

(Varet et Billard, 2007) Varet G., Billard M. et Kuznik F.: Travaux sur l'optimisation du dimensionnement de puits canadien: PuiCana. Projet d'Initiation à la Recherche et Développement, 2007

(Verre, 2005) Univers du verre, www.verre.biz, 2005

(Virgone, 2006) Rapport intermédiaire du projet PREBAT (IMCPBAT), J. Virgone, Centre thermique de Lyon, Décembre 2006

(Vitte, 2007) Le froid solaire par dessication appliqué au bâtiment : Proposition d'une stratégie de régulation du système, Vitte T., Thèse de doctorat de l'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2007

(Wetter, 2004) GenOpt(R) :Generic Optimization Program: User Manual Version 2.0.0, Wetter M., Simulation Research Group, Building Technologies Department, Environmental Energy Technologies Division, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA 94720, http://SimulationResearch.lbl.gov, 2004

(Wikipedia, 2007) Illustration de Hunderwasser, http://de.wikipedia.org/wiki/Bild:Magdeburg_Hundertwasserhaus.jpg, 2007

(Woloszyn, 1999) Modélisation hygro thermo aéraulique des bâtiments multizones : Proposition d'une stratégie de résolution du système couplé, Woloszyn M., Thèse de doctorat de l'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 1999

(Wouters et al, 1995) Les fenêtres sous l'angle de la physique du bâtiment : Evolution et tendances, Wouters P., Martin S., Vandaele L., Article de la publication du Centre Scientifique et Technique de la Construction, 1995 (partie 1) et 1997 (partie2)

(Wright, 1979) "Soleil, nature, architecture", Wright D., Ed. Parenthèses, 1979

(Wright, 1995) Frank Lloyd Wright: The Natural House (1954), Frank Lloyd Wright Collected Writings, Volume 5, New York, Rizzoli, p. 121, 1995.

ANNEXES : LES SOLUTIONS BIOCLIMATIQUES